CLASES ILUSTRADAS

Física Básica

EN 3 PERIODOS

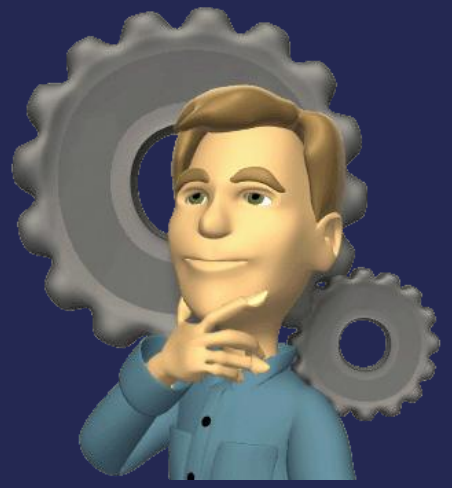
APOYO A LA DOCENCIA

POLIGONO EDICIONES

Dr. Alejandro Valderrama

FÍSICA BÁSICA

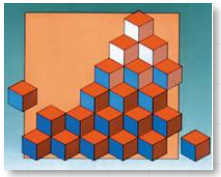
CONTENIDO DEL CURSO Y OBJETIVOS DE APRENDIZAJE



POLIGONO EDICIONES

CLASE DE FÍSICA ILUSTRADA

Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

- *Enunciar los Objetivos Generales del Curso.*
- *Listar los Temas del Curso.*
- *Explicar la importancia de trabajar con un Esquema Cognoscitivo.*
- *Distinguir los diferentes Criterios de Evaluación.*
- *Identificar aspectos básicos para el aprovechamiento del curso.*
- *Elegir un Proyecto de Investigación Aplicativo Integrador.*
- *Reconocer las fechas importantes del Calendario de Actividades .*

FÍSICA BÁSICA

Objetivos Generales

CLAVE:		**LÍNEA CURRICULAR:**	**Física y Química**
CICLO:		TIPO DE UNIDAD DIDÁCTICA:	Curso Teórico-Práctico

Al término del curso, el estudiante será capaz de:

Interpretar los principales fenómenos termodinámicos, acústicos, y ópticos, a través de sus propiedades, para relacionar los fenómenos físicos con sus aplicaciones en ingeniería.

Contenidos

DECLARATIVOS

I. LEYES DE LA TERMODINÁMICA.

1. Introducción: conceptos básicos; propiedades termodinámicas básicas.
2. Transferencia de energía calorífica: conducción; resistencia térmica; convección; radiación.
3. Primera ley de la termodinámica: energía térmica; energía interna; trabajo efectuado por un sistema; enunciado de la primera ley; proceso isobárico; proceso isocórico; proceso isotérmico; proceso adiabático; eficiencia en una máquina térmica.
4. Entropía y segunda ley de la termodinámica: enunciado de la segunda ley; concepto de entropía; definición conceptual del ciclo de *Carnot*.

II. El SONIDO.

1. Terminología: concepto de onda; periodo y frecuencia de oscilación; amplitud; fase; longitud de onda.
2. Ondas sonoras: ondas estacionarias; velocidad del sonido en distintos medios; intensidad de una onda sonora; nivel de sonido y potencia acústica (decibeles).
3. Ondas complejas: armónicas; octavas; concepto de 'espectro'.
4. El oído y la percepción del sonido: sensibilidad del oído; fundamentos de la anatomía del oído; intensidad contra frecuencia; área de auditividad; ancho de banda; relación del timbre con el espectro. (tema para investigación).
5. Fenómenos acústicos: absorción; reflexión; difracción; refracción; difusión; efecto Doppler; interferencia; resonancia (oscilación "en fase" y "fuera de fase").

III. ÓPTICA.

1. Iluminación y fotometría: intensidad luminosa; fuente puntual isotrópica; flujo luminoso; iluminación; principio de fotometría.
2. Reflexión de la luz: ley de la reflexión; espejos planos; espejos esféricos.
3. Refracción de la luz: velocidad de la luz en distintos medios; refracción e índice de refracción; Ley de *Snell*; ángulo crítico para una reflexión total interna; prismas.
4. Lentes: tipos de lentes (convergente y divergente); relación objeto-imagen; potencia de una lente.
5. Instrumentos ópticos: combinaciones de lentes; lupas; microscopios; telescopios.
6. Interferencia y difracción de la luz: ondas coherentes; fase relativa; efectos de la interferencia; difracción; difracción de ranura; límite de resolución en un instrumento óptico.

PROCEDIMENTALES

- Caracterización de los fenómenos termodinámicos, acústicos y ópticos, a través del reconocimiento de sus propiedades físicas.
- Análisis de la relación de los fenómenos físicos con las aplicaciones en ingeniería.
- Aplicación de procedimientos para realizar cálculos propios de los fenómenos que se estudian.
- Aplicación de *software* especializado en la resolución de ejercicios.

ACTITUDINALES

- Valoración de los aportes de la física al campo de la ingeniería.
- Aprecio por la sistematicidad, precisión y rigurosidad en el análisis de los procesos físicos.
- Disposición al trabajo en equipo y a la participación responsable en la realización de tareas en grupo.
- Disposición para plantear problemas de ingeniería en lenguaje matemático, para proponer su solución y su interpretación física.

Es importante mencionar que los temas se cubrirán de manera completa más no exhaustiva.

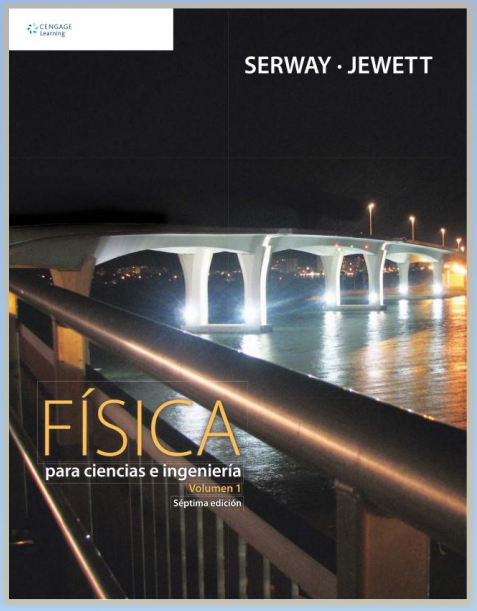
FUENTES DE CONSULTA

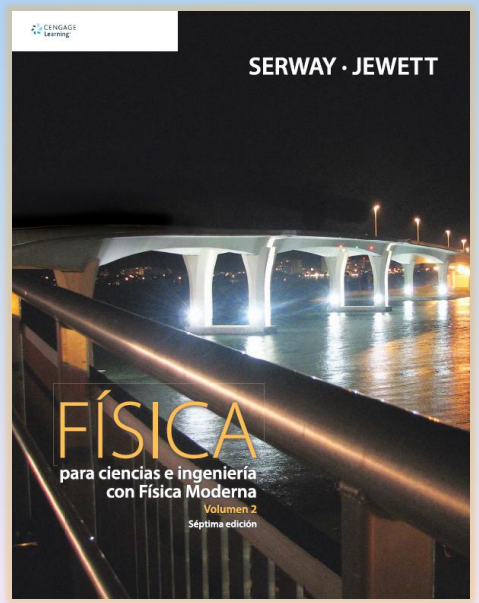
BÁSICA

- Bauer, W. y G. Westfall (2011). *Física para ingeniería y ciencias con física moderna*. Vol. 1 y 2. México: McGraw-Hill.
- Gutiérrez, C. (2011). *Física general*. México: McGraw-Hill.
- Serway R.A. et al. (2009). Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. Vols. I y II. Séptima edición. Cenage Learning.

COMPLEMENTARIA

- De Ersilla, S. B. *et al*. (2008). *Problemas de física: tomo 3: óptica, relatividad y física atómica*. México: Alfaguara.
- Hecht, E. (2010). *Física en perspectiva*. USA: Addison, Wesley.
- Ohanian, H. y J. Markert. (2009). *Física para ingeniería y ciencias*. Vol. 1 y 2. México: McGraw-Hill.





Este libro cuenta con una serie de recursos para el profesor, los cuales se proporcionan a los docentes que lo adopten como texto en sus cursos.

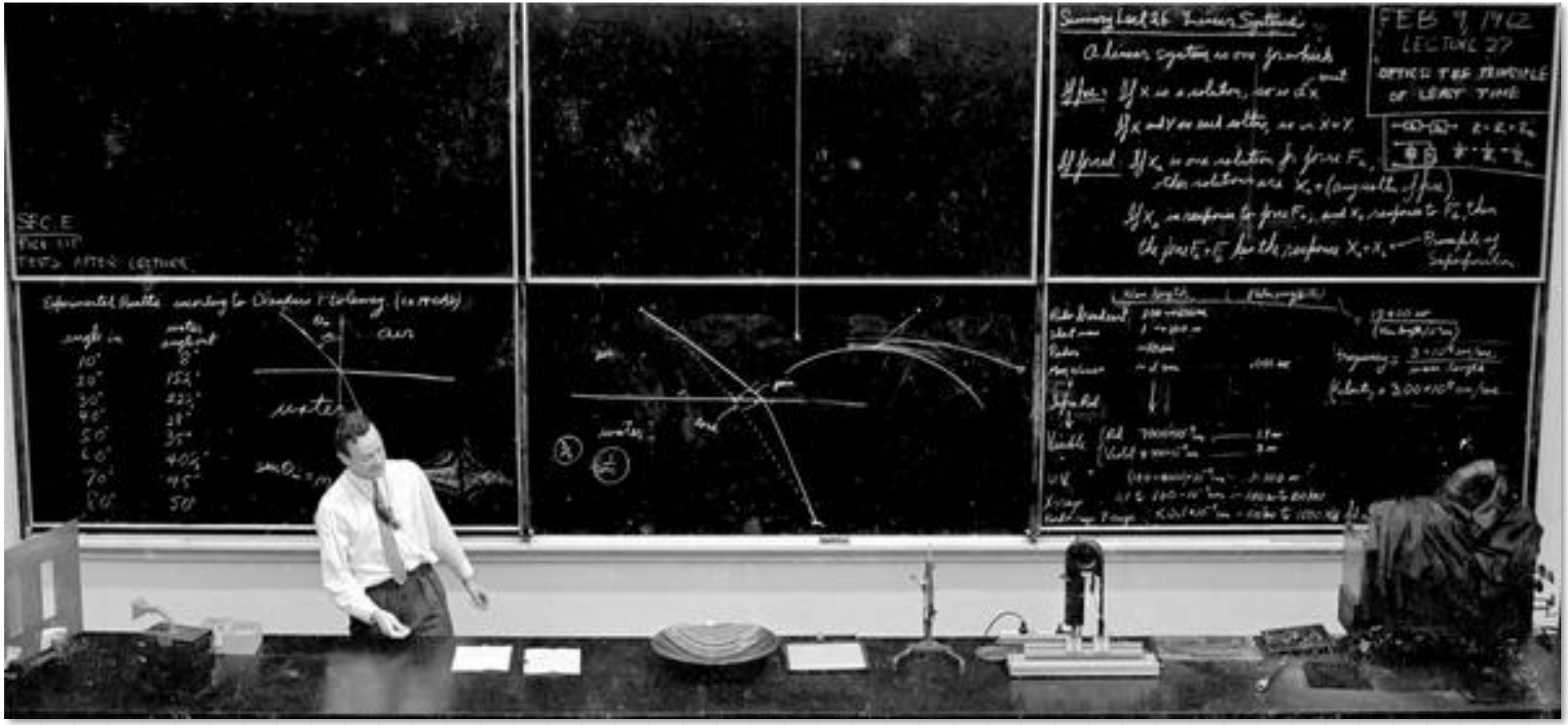
El libro seleccionado para un curso debe ser la principal guía del estudiante para entender y aprender la materia de estudio.

Además, el libro debe tener un estilo accesible y estar escrito para facilitar la enseñanza y el aprendizaje.

Raymond A. Serway
St. Petersburg, Florida

John W. Jewett, Jr.
Pomona, California

Serway R.A. et al. (2009). Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna. Vols. I y II. Séptima edición. Cenage Learning.

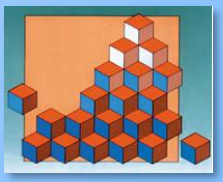


"No sabes nada hasta que lo has practicado"

R. P. Feynman

El cono del aprendizaje
de Edgar Dale

Técnica de Enseñanza



Partiendo de los objetivos generales del curso, todos los temas se desarrollan con base en el siguiente esquema didáctico:

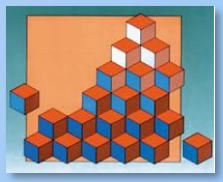
- *Explicación de conceptos relacionados con la materia a estudiar.*
- *Ejemplos sobre las implicaciones de los conceptos y su importancia.*
- *Presentación y desarrollo de las técnicas físico-matemáticas para aplicar los diferentes conceptos a la resolución de problemas particulares.*
- *Tareas (para realizar en casa) para que el estudiante pueda poner en práctica lo aprendido durante las exposiciones de los temas en clase.*

Además, en cada clase, se presentará el desglose de objetivos particulares de cada lección y los índices de contenido correspondientes.

Los temas se desarrollarán como compendios de conceptos y procedimientos físico-matemáticos interrelacionados de modo tal, que expliquen y enseñen la manera de resolver problemas concretos con aplicación directa en las ciencias e ingeniería.

Esta técnica de enseñanza pretende promover en el alumno un dominio consecutivo de habilidades específicas y concretas de manera sistemática, basada en la ejercitación de la aplicación de los conceptos mediante el uso de las herramientas de resolución de problemas en actividades dirigidas.

Esquema Cognoscitivo

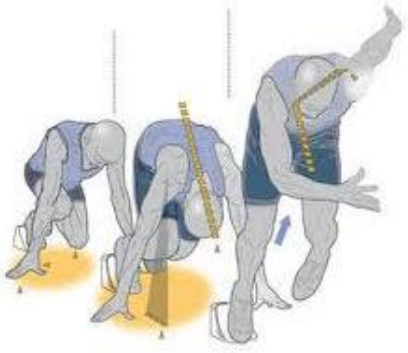


La manera en que se pretende lograr el aprendizaje y dominio de los temas del curso por parte de los alumnos es desarrollando en cada exposición el siguiente esquema cognoscitivo:

- ***Incentivación:*** *Es importante antes que nada desarrollar un interés por los temas a estudiar.*
- ***Información:*** *El alumno deberá ser informado de que lo que va estudiar, su importancia y utilidad.*
- ***Comprensión:*** *El entendimiento de los conceptos de cada tema debe verificarse para garantizar el avance progresivo en la materia.*
- ***Aplicación:*** *Resulta indispensable para fijar los conocimientos aprendidos el realizar las tareas correspondientes a cada tema aplicando las técnicas de resolución de problemas .*
- ***Análisis:*** *Se promoverá en el alumno la capacidad de ahondar en los conocimientos del curso mediante la realización de un trabajo de investigación que le permita conocer la manera en que los temas estudiados se interrelacionan con aplicaciones concretas de la ciencia e ingeniería.*
- ***Síntesis:*** *Se fomentará en el alumno la capacidad de generar aportaciones a los temas estudiados mediante un proyecto aplicativo integrador.*
- ***Trabajo en Grupo:*** *Se propiciará que el alumno trabaje en equipo para que fortalezca sus capacidades de comunicación, organización, cooperación y liderazgo.*

Criterios de Evaluación

MODALIDAD DE EVALUACIÓN	PORCENTAJE DE LA CALIFICACIÓN
Primer Examen Parcial	25 %
Segundo Examen Parcial	25 %
Tercer Examen Parcial	25 %
Tareas (3)	25 %



Puntos para el Estudiante

1. **Asistir a clase puntualmente:** con un 20 % de faltas se pierde el derecho examen. Llegar tarde o ausentarse de la clase más de 5 minutos se toma como falta.

2. **Poner toda la atención posible en clase:** queda estrictamente prohibido llamar por teléfono, enviar continuos mensajes de texto, chatear y hacer búsquedas en internet que no estén solicitadas por el profesor durante la clase. Si el alumno desea atender alguna comunicación deberá hacerlo fuera del salón.

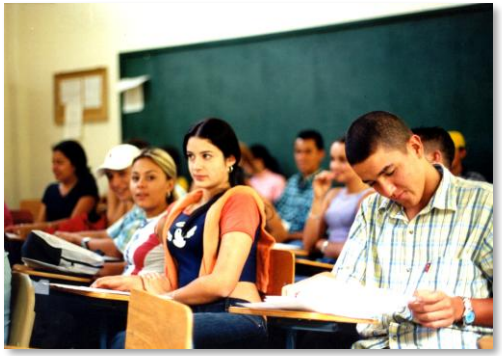
3. **Tomar notas detalladas de clase:** La física conviene escribirse.

4. **Hacer preguntas objetivas:** para comprender mejor la exposición de los conceptos.

5. **Tareas:**

   - Iniciar la tarea el día que se dejó, comenzando con la lectura de cada uno de los problemas.
   - Dedicar al menos una hora de trabajo (cuando así se requiera) por cada problema de las tareas.
   - Traer preguntas relacionadas con la tarea la siguiente clase.
   - Deben realizarse lo más limpio y claro que sea posible, de preferencia en computadora.
   - Después de la fecha de entrega no se aceptarán las tareas.

Reglamento General de Clase



1. **La copia de trabajos, tareas o exámenes se castiga con extraordinario. Es importante fomentar la honestidad en nuestro trabajo siempre.**

2. **Para tener derecho a examen se requiere el 80% de asistencia a clase. Los primeros minutos de la clase se emplearán para pasar lista.**

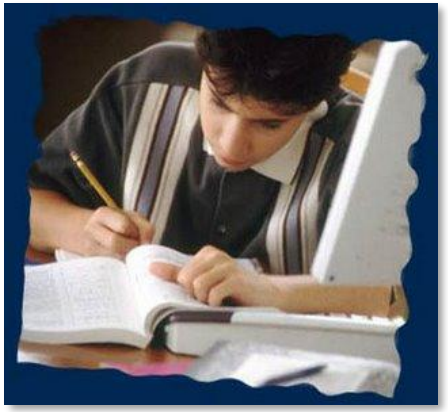
3. **La asistencia se toma exactamente a la hora exacta de la clase. Después de haber pasado lista, los alumnos podrán entrar a clase pero con falta. No existe el retardo.**

4. **No se permitirá a los alumnos permanecer dentro del salón de clase usando sombreros gorros ó cachuchas, tampoco deberán introducir alimentos ni bebidas.**

5. **No se permitirá a los alumnos salir ni entrar al salón durante el desarrollo de la clase sin permiso del profesor.**

6. **El salón deberá desalojarse 5 minutos antes de la hora marcada para el término de la clase.**

Reglamento de Tareas



1. **Las tareas solo se reciben el día indicado.**
2. **No existen los trabajos extra para subir calificación.**
3. **No se pueden utilizar hojas recicladas para entregar las tareas (deben reciclarse después para el trabajo en casa, borradores etc.)**
4. **Copiar y pegar una tarea que se demuestre que se sacó de Internet se castiga con el extraordinario.**
5. **Las hojas que se entreguen deben de estar libres de espiral, de otro modo, no se recibirán.**
6. **Las tareas entregadas en computadora tendrán un punto extra.**

Reglamento de Exámenes

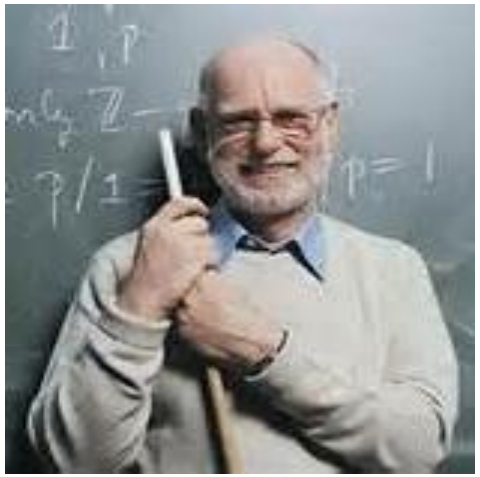
1. **No se permite el uso de formularios.**
2. **Cualquier pregunta debe de dirigirse al profesor.**
3. **Los resultados deben de marcarse claramente con pluma o con lápiz.**
4. **Todo alumno es responsable de revisar que en el lugar en que realice el examen no esté rayada la banca con información útil para el examen, ni se encuentren hojas debajo del banco o cuadernos aparentemente sin dueño. De encontrarse este tipo de información se asume que la persona sentada en el lugar más próximo es dueña de la información.**
5. **Para evitar confusión, todas las pertenencias de los alumnos que no se utilicen para resolver el examen permanecerán en la tarima del pizarrón.**
6. **El examen se puede contestar en el orden que convenga al alumno, siempre y cuando este bien señalada cada respuesta.**
7. **Una vez iniciado un ejercicio, se recomienda resolver los incisos en orden, ya que estos están colocados en la secuencia adecuada para obtener un resultado.**
8. **Permitir que una persona copie o copiar se castiga con el extraordinario.**

La Responsabilidad de Estudiar

Afronta la realidad

Con frecuencia nos gusta criticar a los profesores cuando obtenemos malos resultados en la materia o malas calificaciones en los exámenes. Tienes que entender que el maestro sólo califica lo que tú pones en el examen, entonces, quien realmente se califica eres tú.

Es importante saber que **a ningún profesor le gusta reprobar a sus alumnos**, al contrario, esperan obtener buenos resultados de cada estudiante. Para un maestro el no poder ayudar a un estudiante a desarrollar sus potencialidades es muy frustrante y lo considera como un fracaso propio.



Enseñar no es tarea fácil, siempre hay profesores mejores que otros, pero debes recordar que la responsabilidad de estudiar es tuya y que ni los maestros ni nadie más tienen un control total sobre tus calificaciones.

La Responsabilidad de Estudiar

Pasos para asimilar y retener los contenidos

Ahora conocerás los cuatro pasos fundamentales para un estudio de calidad, conviértelos en algo habitual y automático en tu trabajo diario.

1. Forma una idea general del tema mediante una lectura rápida. Esta visión te servirá para conocer las ideas básicas: qué pretende el autor, qué te sugieren los subtítulos y qué conocimientos previos tienes sobre el tema.

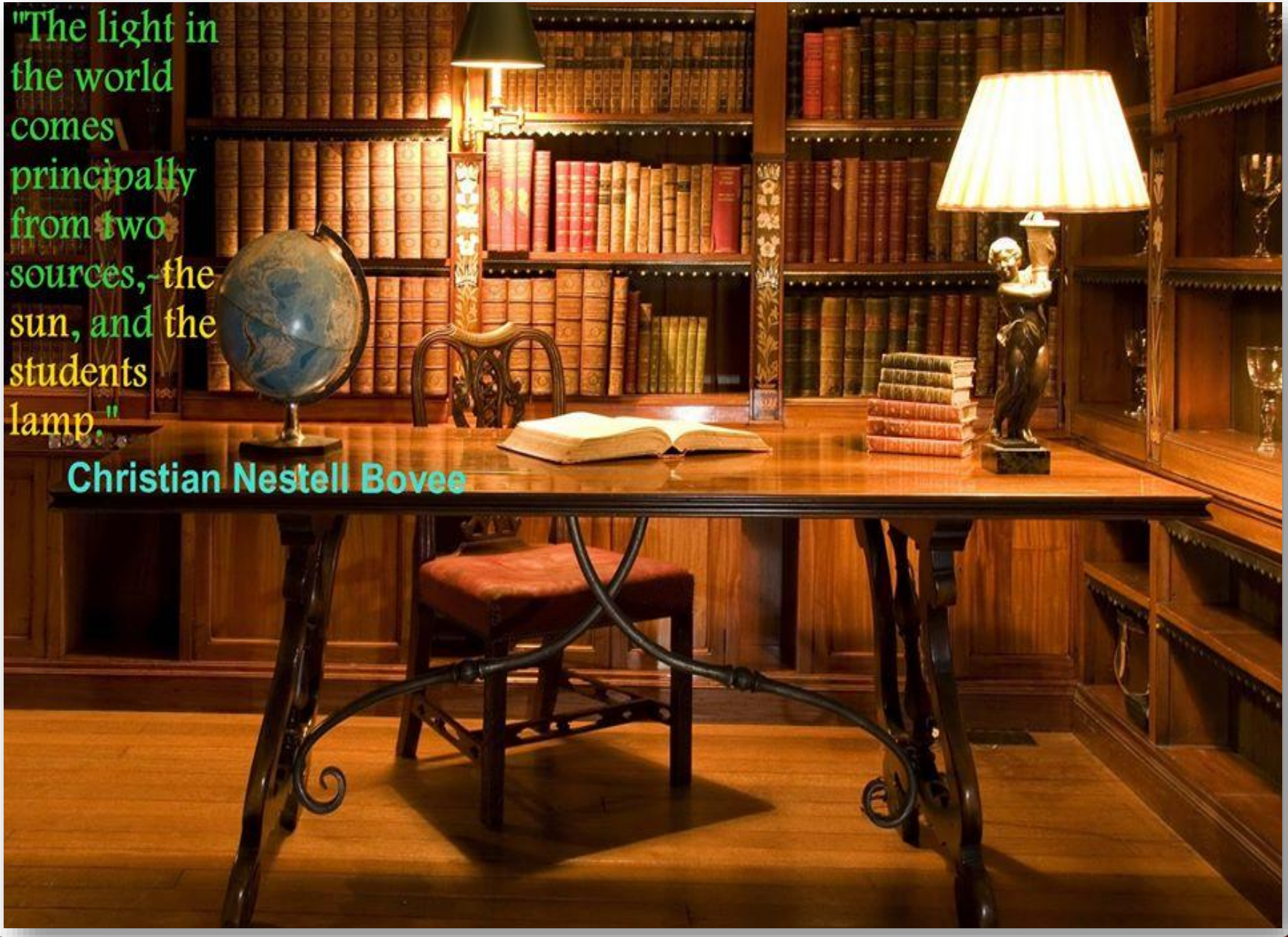
2. Divide el tema en unidades menores: apartados, preguntas y párrafos. Busca la idea central de cada párrafo y plantea preguntas sobre ella. Subraya, haz esquemas y resúmenes.

3. Expresa las ideas principales de cada párrafo (mentalmente y por escrito) y relaciónalas. Hazlo sin ayuda del libro ni de los apuntes. Sintetiza las ideas y estructúralas por orden de importancia. Este tercer punto te sirve de autoevaluación.

4. Repasa lo estudiado en las clases anteriores. Evitarás posibles confusiones y realizarás un autoexamen de comprensión, asimilación y retención de contenidos básicos.

Esfuérzate a diario y verás que tendrás buenos resultados.

Es mejor el estudio individual, sobre todo en época de exámenes.


"The light in the world comes principally from two sources,-the sun, and the students lamp."
Christian Nestell Bovee

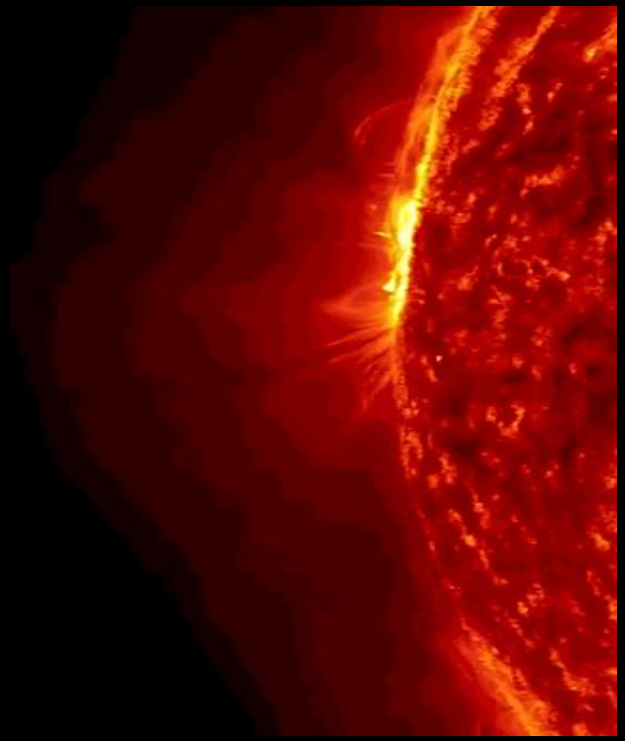
Calendario

SEMANA	PERIODO	FECHAS	ACTIVIDADES	DEBERES DEL ALUMNO
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				

Nota: Conviene consultar el Calendario escolar para más detalles.

FÍSICA BÁSICA

LEYES DE LA TERMODINÁMICA



Física +Matemáticas en Acción

POLIGONO EDICIONES

CLASE DE FÍSICA ILUSTRADA

Contenidos

DECLARATIVOS

I. LEYES DE LA TERMODINÁMICA.

1. Introducción: conceptos básicos; propiedades termodinámicas básicas.

2. Transferencia de energía calorífica: conducción; resistencia térmica; convección; radiación.

3. Primera ley de la termodinámica: energía térmica; energía interna; trabajo efectuado por un sistema; enunciado de la primera ley; proceso isobárico; proceso isocórico; proceso isotérmico; proceso adiabático; eficiencia en una máquina térmica.

4. Entropía y segunda ley de la termodinámica: enunciado de la segunda ley; concepto de entropía; definición conceptual del ciclo de *Carnot*.

Es importante mencionar que los temas se cubrirán de manera completa más no exhaustiva.

Curso de Física Avanzada

Temperatura

Primera ley de la termodinámica

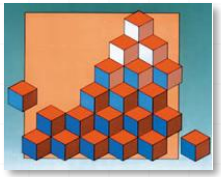
Teoría cinética de los gases

Máquinas térmicas, entropía y segunda ley de la termodinámica

Temperatura

Temperatura y ley cero de la termodinámica
Termómetros y escala de temperatura Celsius
Termómetro de gas a volumen constante y escala absoluta de temperatura
Expansión térmica de sólidos y líquidos
Descripción macroscópica de un gas ideal

Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

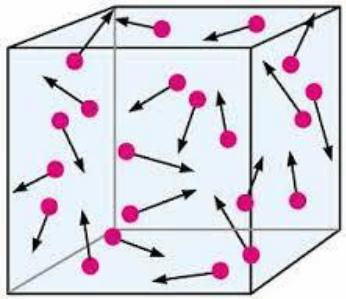
- *Explicar el concepto de temperatura y enunciar la Ley cero de la Termodinámica.*
- *Distinguir en los termómetros las diferentes escalas de temperatura.*
- *Identificar las características fundamentales de la escala de temperatura absoluta.*
- *Reconocer las características de la expansión de los sólidos y líquidos.*
- *Hacer una descripción macroscópica de un gas ideal.*

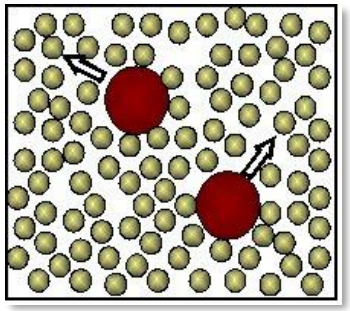
Termodinámica

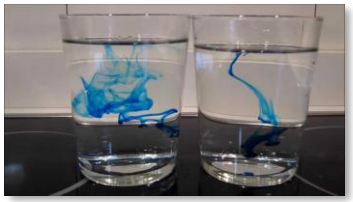
Abarca situaciones en que la temperatura o el estado, sólido, líquido, gas (o plasma), de un sistema cambian debido a transferencias de energía.

La termodinámica permite explicar las propiedades volumétricas de la materia y los mecanismos de átomos y moléculas.

El desarrollo histórico de la termodinámica fue paralelo al de la teoría atómica de la materia. Hacia 1820 los experimentos químicos habían proporcionado evidencia contundente de la existencia de los átomos. En aquella época, los científicos reconocieron que entre la termodinámica y la estructura de la materia debía existir una conexión. En 1827, el botánico Robert Brown reportó que granos de polen suspendidos en un líquido se movían erráticamente de un lugar a otro como si estuvieran bajo agitación constante.







Fenómeno de Difusión

Historia del calor:

Hace mucho tiempo se creía que le calor era un fluido invisible e imponderable llamado ***CALÓRICO***, que se producía cuando una sustancia se **quemaba.**

Se pensaba que cuando dos cuerpos estaban en contacto, el de mayor temperatura cedía ***calórico*** al cuerpo de menor temperatura.

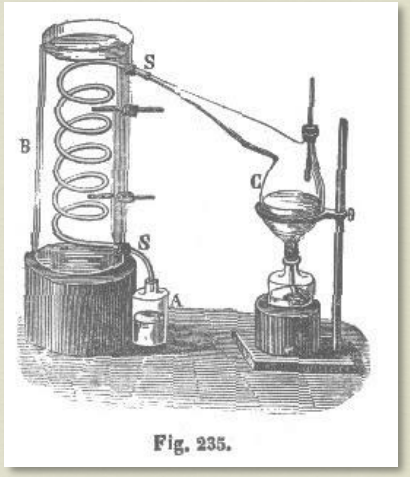


Fig. 235.

El abandono de esta teoría forma parte del avance general de la física durante los siglos XVlll y XlX.

¿Qué es el calor?

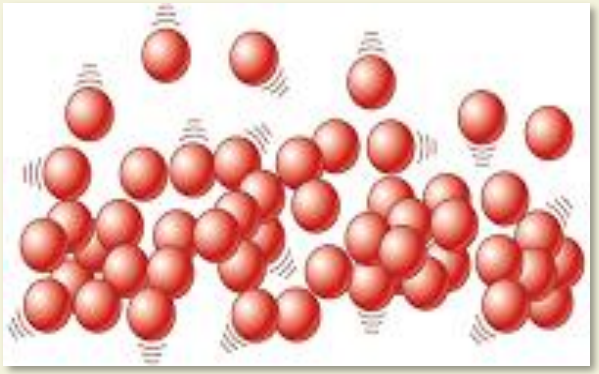
Es una forma de energía que, debido a una diferencia de temperatura:

- Se transfiere entre un sistema y su entorno.
- Se transfiere entre un sistema y otro entre ambos.

La energía fluye del sistema de mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

¿Qué es el calor?

La materia está constituida por moléculas en constate movimiento.



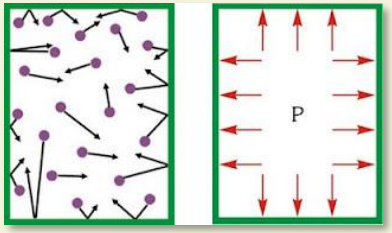
El ***calor*** se asocia al cambio de temperatura y esta a su vez se relaciona con la energía molecular interna de una sustancia.

El calor es: ***energía térmica que fluye de un sistema de mayor temperatura a otro de menor temperatura***.

La temperatura **no** es una medida de calor, es el promedio de la energía interna molecular.

La variación en la energía interna no solo se da por el suministro de calor (***Conducción***), también se puede dar por acción de otras formas de energía: ***Radiación, Convección.***

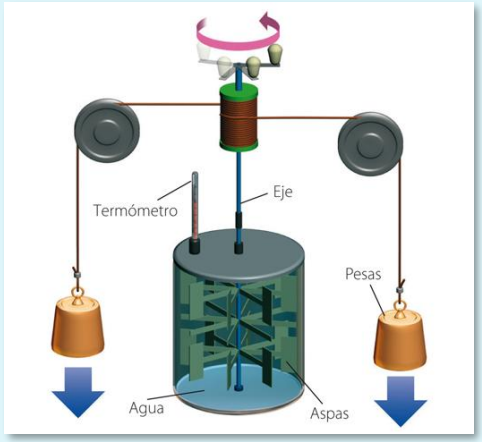
- **Energía Interna:** es la energía de un sistema asociada al movimiento de sus componentes microscópicos, átomos y moléculas.
- **Calor:** Transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debido a la diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno.



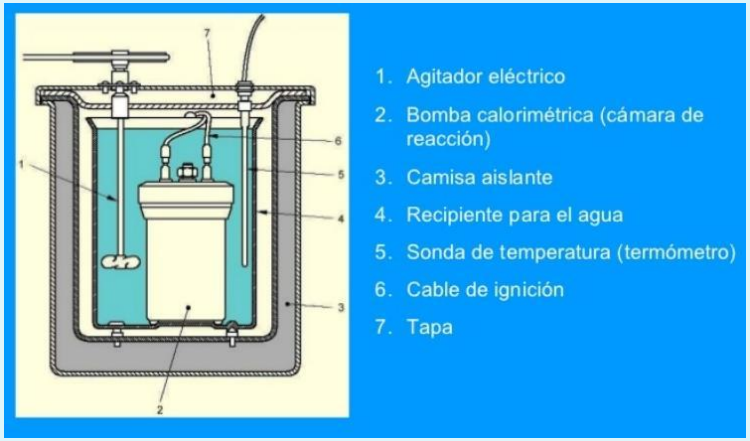
Unidades de calor

Del nombre del mítico fluido, ***el calórico***, se tiene una unidad de energía relacionada con los procesos térmicos: **La caloría (cal).**

Caloría: Cantidad de trasferencia de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5 ° C a 15.5° C.

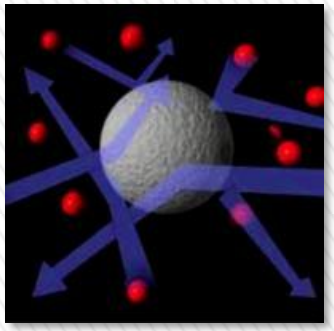


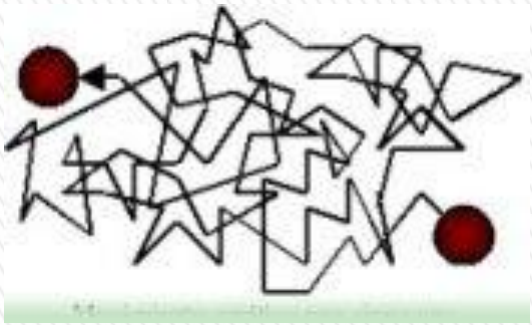
Equivalente mecánico del calor



Medidor de Calorías para los alimentos

En 1905, Albert Einstein usó la teoría cinética para explicar la causa de este movimiento errático, conocido en la actualidad como *movimiento browniano*. Einstein explicó este fenómeno al suponer que los granos están bajo bombardeo constante de moléculas "invisibles" en el líquido, y que son éstas las que se mueven erráticamente. Esta explicación dio luz a los científicos acerca del concepto de movimiento molecular y proporcionó credibilidad a la idea de que la materia está hecha de átomos.





(1879-1955)

1. El calor o el aumento de la temperatura no es más que la **vibración de los átomos**. A mayor temperatura, mayor movimiento atómico.

2. Los átomos golpean a las partículas por todos lados, y la suma de todas estas fuerzas mueven a las partículas en una dirección o en otra.

3. También dedujo que si mediamos el recorrido promedio de una partícula, en lugar de su recorrido real, podíamos obtener el numero de Avogadro (una constante muy utilizada en química), para explicarlo de otra manera, no importaba cuantas vueltas diera un coche para llegar a su destino sino la distancia real en línea recta desde donde partió hasta su destino.

Avogadro
(1776-1856)

El nacimiento de la química como ciencia moderna

1811. Hipótesis de Avogrado. Volúmenes iguales de todos los gases, a la misma presión y temperatura, contienen el mismo número de moléculas.

CONCEPTO DE MOL - NÚMERO DE AVOGADRO

NÚMERO DE AVOGADRO: Es el número de átomos contenidos en 12 g del isótopo del carbono 12 y tiene un valor de $N_A = 6{,}023 \times 10^{23}$

NÚMERO DE AVOGADRO

$N_A = 6{,}023 \times 10^{23}$

MOL: **Es la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales (átomos, electrones, moléculas, iones) como átomos hay en 12 g del isótopo del carbono 12. Ejemplo:**

➡ **1 mol de átomos contiene** $6{,}023 \times 10^{23}$ **átomos**

Número de Avogadro

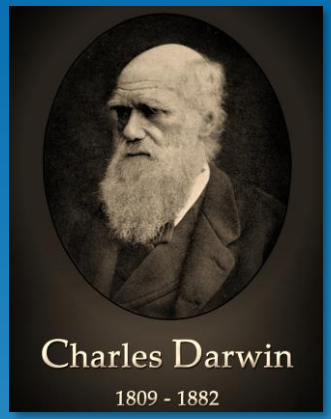
Temperatura y ley cero de la termodinámica

temperatura, calor y *energía interna.*

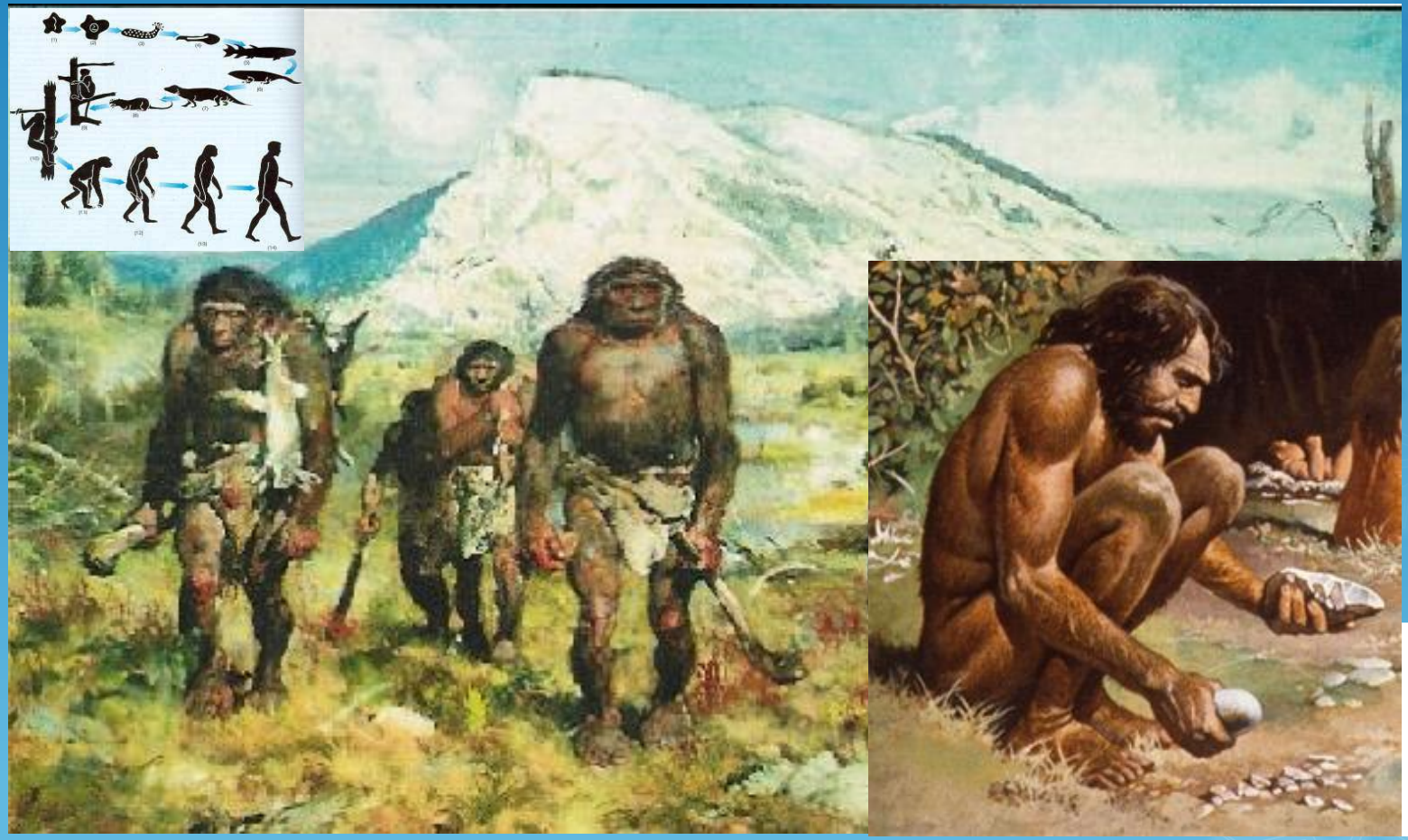
A continuación se considera la importancia de la sustancia que se investiga cuando se estudian fenómenos térmicos. Por ejemplo, los gases se expanden con gran libertad cuando se calientan, mientras que los líquidos y los sólidos tienen una expansión ligera.

Con frecuencia el concepto de temperatura se asocia con qué tan caliente o frío se siente un objeto cuando se toca. De esta forma, los sentidos proporcionan una indicación cualitativa de la temperatura. Sin embargo, los sentidos no son confiables y con frecuencia hacen que uno se equivoque. Por ejemplo, si retira del refrigerador una charola metálica de hielos y una caja de cartón de vegetales congelados, la charola de hielos se siente más fría que la caja, *aun cuando ambas estén a la misma temperatura.* Los dos objetos se sienten diferentes porque el metal transfiere energía por calor a una proporción mayor que el cartón.

Vs.



Evolución natural y de los sentidos



Los receptores cutáneos no están distribuidos uniformemente por la superficie del cuerpo, sino que hay regiones con una mayor densidad por lo que presentan también mayor sensibilidad.

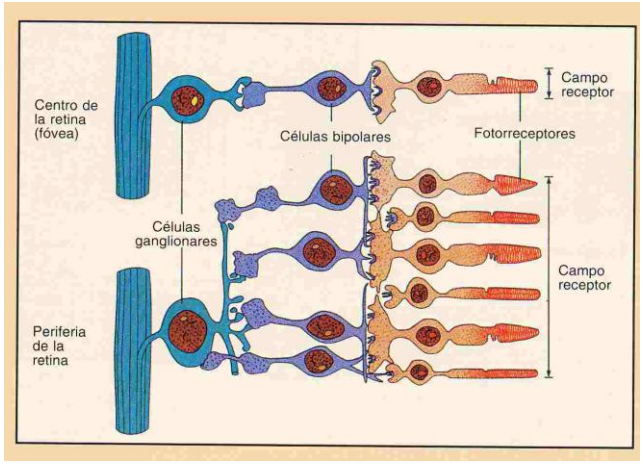
Las zonas más sensibles son la punta de la lengua, los labios, la punta de los dedos, el dorso de la mano y la cara. Los receptores cutáneos son dendritas de neuronas sensitivas que pueden encontrarse encapsuladas, formando discos o terminaciones nerviosas libres.

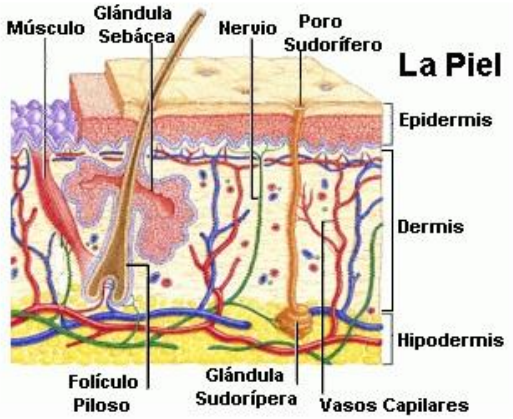
Algunos de los principales receptores de la percepción táctil son:

• **Corpúsculo de Paccini:** Responden a la vibración y se caracterizan por ser receptores de respuesta rápida y proporcionar una escasa sensibilidad espacial.

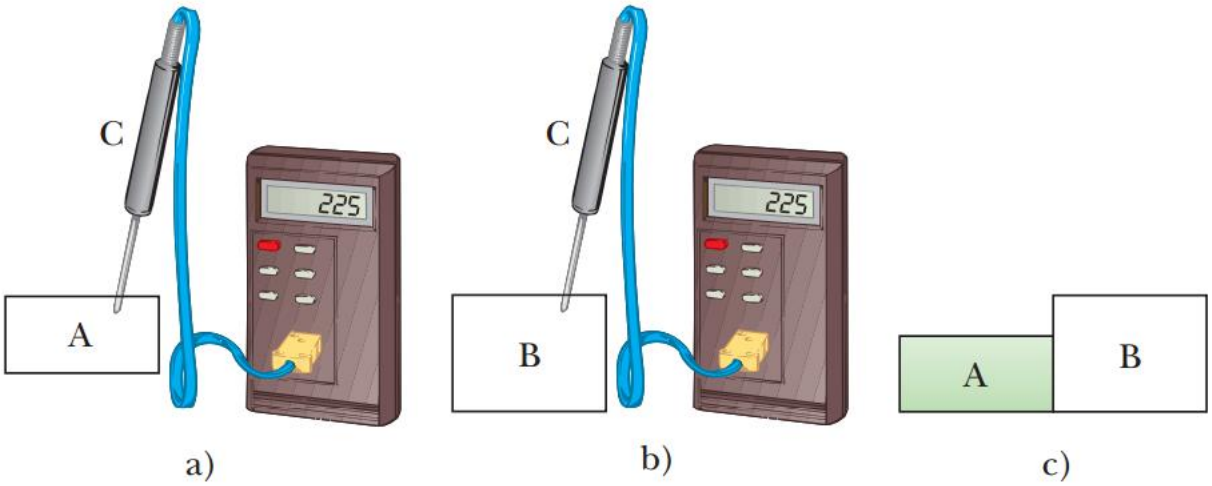
• **Terminaciones nerviosas libres para el dolor y "temperatura":** Son los receptores más simples y numerosos. Se reparten por la mayor parte de la superficie corporal y sus dendritas llegan hasta la epidermis.

• **Receptores articulares:** su densidad es altísima en la palma de la mano y en los pies. Informan sobre la presión y la ubicación del estímulo.





Lo que se necesita es un método confiable y reproducible para medir lo caliente o lo frío relativo de los objetos en lugar de la rapidez de transferencia de energía.



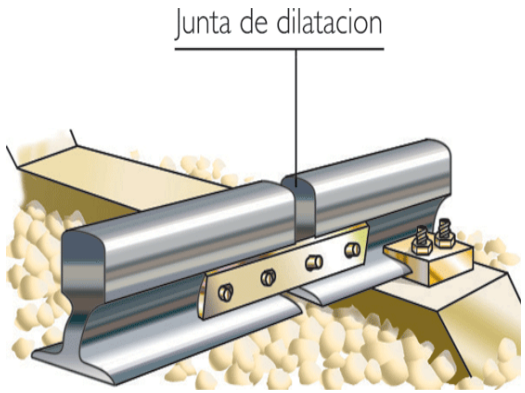
Ley cero de la termodinámica (a, b). Si las temperaturas de A y B se miden como iguales al colocarlas en contacto térmico con un termómetro (objeto c), no se intercambiará energía entre ellos cuando se coloquen en contacto térmico mutuo c).

un cubo de hielo se deja caer en una taza de café caliente, el cubo de hielo se funde y la temperatura del café disminuye.

Pregunta Dos objetos, con diferentes tamaños, masas y temperaturas, se ponen en contacto térmico. ¿En qué dirección viaja la energía? a) La energía viaja del objeto más grande al objeto más pequeño. b) La energía viaja del objeto con más masa al que tiene menos masa. c) La energía viaja del objeto con mayor temperatura al objeto con menor temperatura.

Termómetros y escala de temperatura Celsius

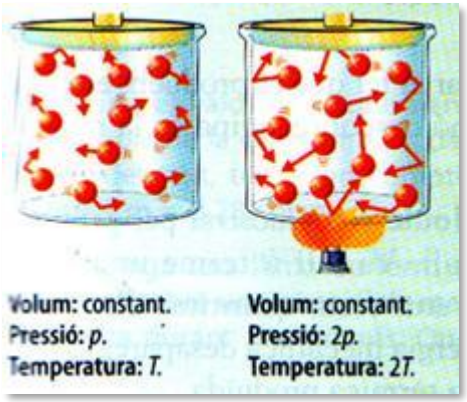
Algunas propiedades físicas que cambian con la temperatura son 1) el volumen de un liquido, 2) las dimensiones de un solido, 3) la presión de un gas a volumen constante, 4) el volumen de un gas a presión constante, 5) la resistencia electrica de un conductor y 6) el color de un objeto.

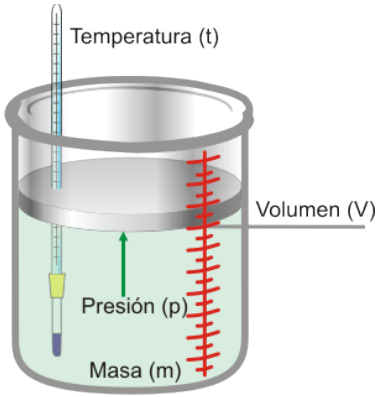


Dilatación: Casi todos los materiales se expanden al aumentar la temperatura. Los cambios de temperatura por lo regular traen consigo cambios en las dimensiones de los cuerpos, ya sean sólidos, líquidos o gases.

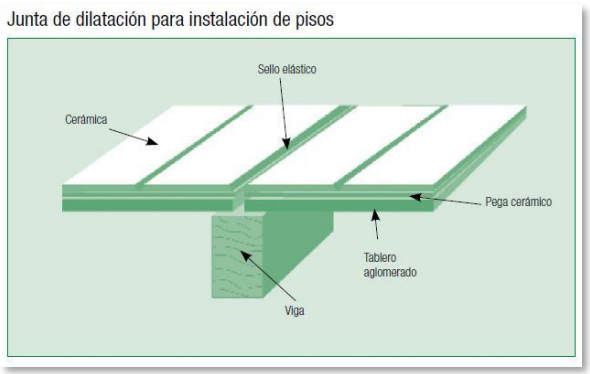
Al aumentar su temperatura, el movimiento de sus partículas se vuelven más rápido y se incrementa la separación entre ellas, lo que hace que se expandan.

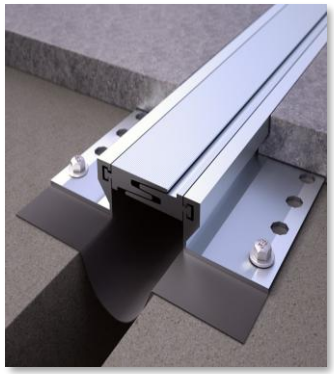
Los gases se dilatan mucho más que los líquidos ya que Las uniones entre las moléculas de los gases son las menos fuertes y las que más se dilatan en presencia de calor; les siguen los líquidos y por último, los sólidos.





Este fenómeno conocido como expansión térmica o dilatación, tiene importante papel en numerosas aplicaciones de ingeniería por ejemplo en la construcción de edificios, puentes y carreteras de concreto, vías de ferrocarril, muros de ladrillo y puentes para compensar cambios dimensionales que ocurren cuando cambia la temperatura.





Dilatación lineal:

Es el incremento en la longitud de un material debido a un aumento en su temperatura.

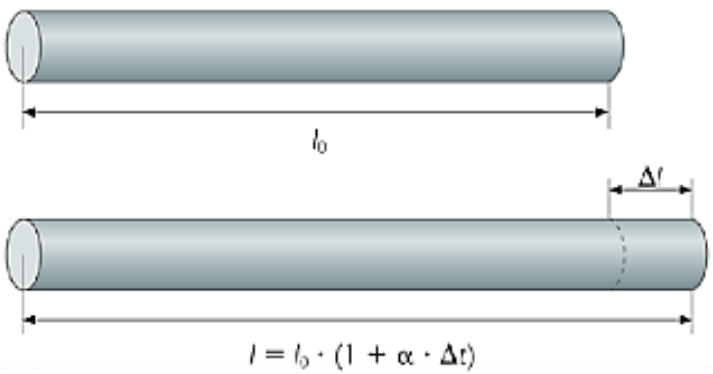
En muchos casos, la variación en las dimensiones de un sólido es imperceptible a simple vista; en algunos otros, es posible observarlo.

Pregunta para la clase: *¿Cómo es posible que la longitud aumente por efecto de la temperatura?*

Ejemplo: *Suponga que una varilla de material tiene una longitud Lo a una temperatura inicial de To.*

Si la temperatura cambia en ΔT, la longitud cambia en ΔL. Introduciendo una constante de proporcionalidad (diferente para cada material) llamada coeficiente de expansión térmica lineal del material, se tiene:

$$\Delta L = \alpha L_o \Delta T$$



Ejercicio para la clase:

Una de las ciudades más calurosas de México es Hermosillo, sonora. Un día de verano amanece a una temperatura de 25° C y alrededor de las 15:00 p.m. se eleva a 40° C. ¿Cuál será el incremento de longitud en cm de un cable de alta tensión de acero de 200 m? (el coeficiente de expansión térmica es: $\alpha = 11.5 \times 10^{-6}\ 1/°\ C$ *).*

Termómetros

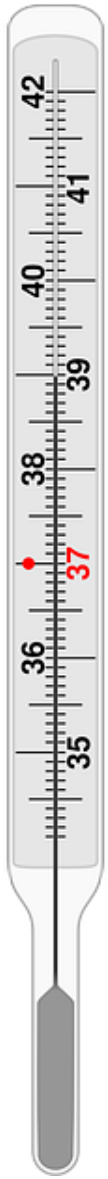
Un termómetro de uso cotidiano consiste de una masa de liquido, por lo general mercurio o alcohol, que se expande en un tubo capilar de vidrio cuando se calienta.

- La propiedad física que cambia es el volumen del liquido.

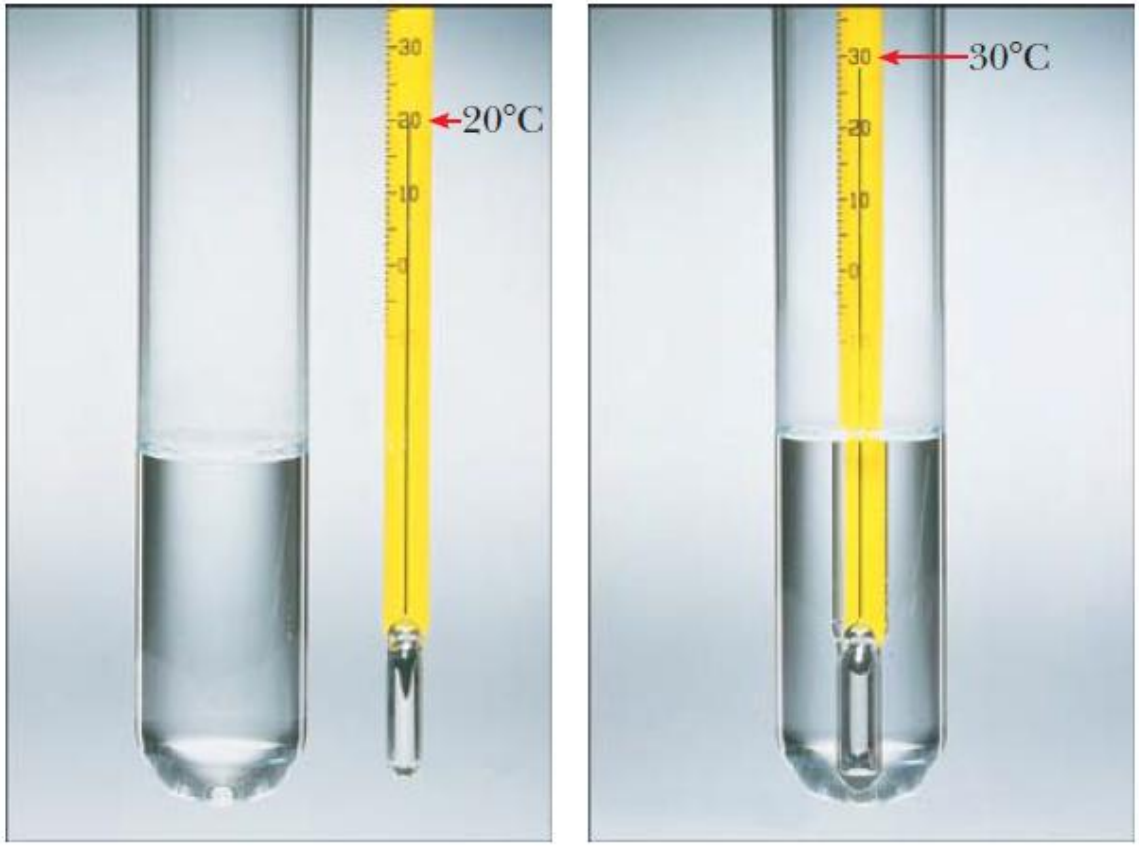
- Cualquier cambio de temperatura se define como proporcional al cambio en longitud de la columna de liquido.

- El termómetro se calibra en contacto térmico con un sistema natural a temperatura constante.
  - ✓ **Ejemplo:** Mezcla de agua y hielo en equilibrio térmico y a presión atmosférica.
  - ✓ Así se define como una temperatura de cero grados Celsius, 0° C; al **punto de hielo del agua**.
  - ✓ Una mezcla de agua y vapor en equilibrio térmico a presión atmosférica; se define como 100° C, que es el **punto de vapor del agua**.

- Entre estos dos puntos, la longitud de la columna de liquido se divide en 100 segmentos iguales para crear la escala Celsius.



Termómetros



Como resultado de expansión térmica, el nivel del mercurio en el termómetro se eleva a medida que el termómetro se calienta debido al agua en el tubo de ensayo.

Un problema adicional, de cualquier termómetro, es el intervalo limitado de temperaturas en las que se puede usar.

- **Un termómetro de mercurio, por ejemplo, no se puede usar por abajo del punto de congelación del mercurio, que es -39° C, y**

- **Un termómetro de alcohol no es útil para medir temperaturas superiores a 85° C, el punto de ebullición del alcohol.**

Para superar este problema, es necesario un termómetro universal cuyas lecturas sean independientes de la sustancia que se use.

Termómetro de gas a volumen constante y escala absoluta de temperatura

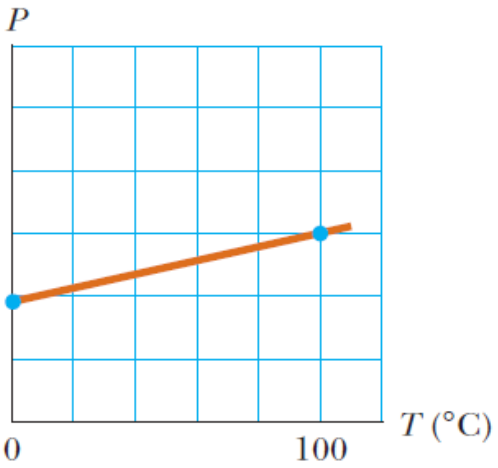
El termómetro de gas de volumen constante es muy exacto, y tiene un margen de aplicación extraordinario, pero es más complicado, por lo que se utiliza más bien como un instrumento normativo para la graduación de otros termómetros.

Termómetro de gas a volumen constante y escala absoluta de temperatura

Se compone de una ampolla con gas -helio, hidrógeno o nitrógeno, según la gama de temperaturas deseada- y un manómetro medidor de la presión.

Se pone la ampolla del gas en el ambiente cuya temperatura hay que medir, y se ajusta entonces la columna de mercurio (manómetro) que está en conexión con la ampolla, para darle un volumen fijo al gas de la ampolla.

La altura de la columna de mercurio indica la presión del gas. A partir de ella se puede calcular la temperatura.



Una gráfica representativa de presión con temperatura tomada con un termómetro de gas a volumen constante. Los dos puntos representan temperaturas de referencia conocidas (los puntos de hielo y vapor del agua).

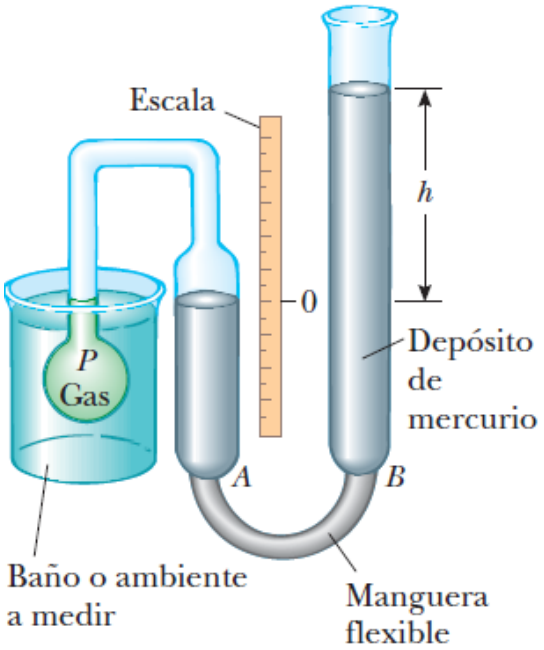


Figura 19.3 Un termómetro de gas a volumen constante mide la presión del gas contenido en la ampolleta sumergida en un baño. El volumen del gas en la celda se mantiene constante al elevar o bajar el depósito *B* para mantener constante el nivel de mercurio en la columna *A*.

Ahora suponga que usa termómetros de gas para medir las temperaturas de varios gases a diferentes presiones iniciales. Los experimentos demuestran que las lecturas del termómetro son casi independientes del tipo de gas usado, en tanto la presión del gas sea baja y la temperatura esté arriba del punto en el que el gas se licua (figura 19.5). La concordancia entre termómetros que usan varios gases mejora a medida que se reduce la presión.

Si las líneas rectas de la figura se extienden hacia temperaturas negativas, se encuentra que:

¡en cada caso, la presión es cero cuando la temperatura es –273.15° C!

Este hallazgo sugiere un papel especial de dicha temperatura.

Se usa como la base para la **escala absoluta de temperatura.**

Así, –273.15° C es el cero absoluto.

Su indicación es cero porque a temperatura muy baja la presión del gas se hace negativa, lo que no tiene sentido.

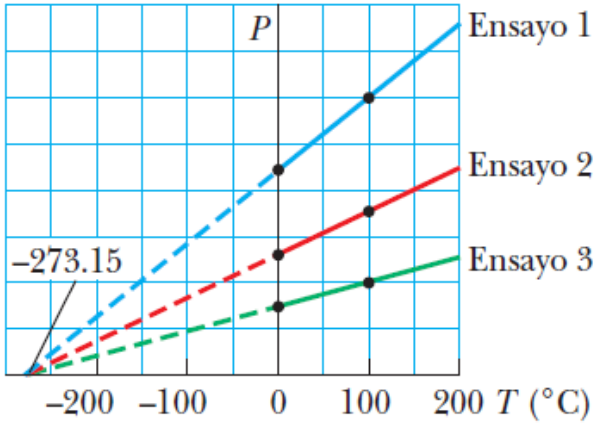


Figura 19.5 Presión con temperatura para ensayos experimentales en gases que tienen diferentes presiones en un termómetro de gas a volumen constante. Note que, para los tres ensayos, la presión se extrapola a cero en la temperatura −273.15°C.

El tamaño de un grado en la escala absoluta de temperatura se elige como idéntica al tamaño de un grado en la escala Celsius. Debido a eso, la conversión entre dichas temperaturas es:

$$T_C = T - 273.15$$

donde T_C es la temperatura Celsius y T es la temperatura absoluta.

Ya que los puntos de hielo y vapor son experimentalmente difíciles de duplicar y dependen de la presión atmosférica, en 1954 el Comité Internacional de Pesos y Medidas adoptó una escala absoluta de temperatura en función de dos nuevos puntos fijos. El primer punto es el cero absoluto. La segunda temperatura para esta nueva escala se eligió como el **punto triple del agua**, que es la combinación única de temperatura y presión en la que el agua líquida, gaseosa y sólida (hielo) coexisten en equilibrio. Este punto triple se presenta una temperatura de 0.01°C y una presión de 4.58 mm de mercurio. En la escala nueva, que usa la unidad *kelvin*, la temperatura del agua en el punto triple se estableció en 273.16 kelvins, abreviada 273.16 K. Esta elección se hizo de modo que la antigua escala absoluta de temperatura de acuerdo en los puntos de hielo y vapor concordaría de modo cercano con la nueva escala en función del punto triple. Esta escala de temperatura absoluta nueva (también llamada **escala Kelvin**) emplea la unidad del SI de temperatura absoluta, el **kelvin**, que se define como **1/273.16 de la diferencia entre el cero absoluto y la temperatura del punto triple del agua**.

Las escalas de temperatura Celsius, Fahrenheit y Kelvin

La ecuación 19.1 muestra que la temperatura Celsius T_C se desplaza de la temperatura absoluta (Kelvin) T en 273.15°. Ya que el tamaño de un grado es el mismo en las dos escalas, una diferencia de temperatura de 5°C es igual a una diferencia de temperatura de 5 K. Las dos escalas difieren sólo en la elección del punto cero. Por lo tanto, la temperatura del punto de hielo en la escala Kelvin, 273.15 K, corresponde a 0.00°C, y el punto de vapor en la escala Kelvin, 373.15 K, es equivalente a 100.00°C.

Una escala de temperatura común y de uso actual en Estados Unidos es la **escala Fahrenheit**. Dicha escala ubica la temperatura del punto de hielo en 32°F y la temperatura del punto de vapor en 212°F. La relación entre las escalas de temperatura Celsius y Fahrenheit es

$$T_F = \tfrac{9}{5}T_C + 32°\text{F} \qquad \textbf{(19.2)}$$

A partir de las ecuaciones 19.1 y 19.2 se encuentra una correspondencia entre los cambios de temperatura en las escalas Celsius, Kelvin y Fahrenheit:

$$\Delta T_C = \Delta T = \tfrac{5}{9}\,\Delta T_F \qquad \textbf{(19.3)}$$

De estas tres escalas de temperatura, sólo la escala Kelvin está en función de un verdadero valor de temperatura cero. Las escalas Celsius y Fahrenheit se basan en un cero arbitrario asociado con una sustancia particular, agua, en un planeta particular, la Tierra. En consecuencia, si usted encuentra una ecuación que pida una temperatura T o que involucre una relación de temperaturas, *debe* convertir todas las temperaturas a kelvins. Si la ecuación contiene un cambio en temperatura ΔT, usar las temperaturas Celsius le dará la respuesta correcta, a la luz de la ecuación 19.3, pero siempre es *más seguro* convertir las temperaturas a la escala Kelvin.

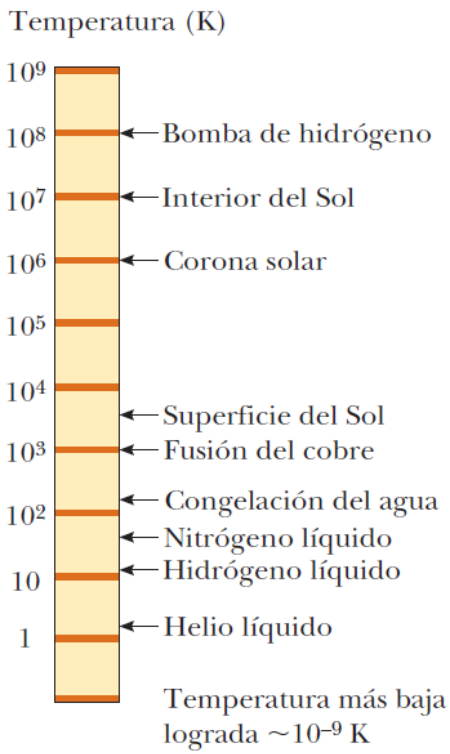


Figura 19.6 Temperaturas absolutas a las que ocurren varios procesos físicos. Note que la escala es logarítmica.

EJEMPLO 19.1 Conversión de temperaturas

En un día la temperatura alcanza 50°F, ¿cuál es la temperatura en grados Celsius y en kelvins?

SOLUCIÓN

Conceptualizar En Estados Unidos una temperatura de 50°F se entiende muy bien. Sin embargo, en muchas otras partes del mundo, esta temperatura puede no tener sentido porque las personas están familiarizadas con la escala de temperatura Celsius.

Categorizar Este ejemplo es un simple problema de sustitución.

Sustituya la temperatura dada en la ecuación 19.2:

$$T_C = \tfrac{5}{9}(T_F - 32) = \tfrac{5}{9}(50 - 32) = 10^\circ\text{C}$$

Use la ecuación 19.1 para encontrar la temperatura Kelvin:

$$T = T_C + 273.15 = 10^\circ\text{C} + 273.15 = 283\ \text{K}$$

Un conjunto de equivalentes de temperatura relacionados con el clima que conviene tener en mente es que 0°C es (literalmente) congelación a 32°F, 10°C es fresco a 50°F, 20°C es temperatura ambiente, 30°C es caliente a 86°F y 40°C es un día caluroso a 104°F.

SOLUCIÓN

Conceptualizar En Estados Unidos una temperatura de 50°F se entiende muy bien. Sin embargo, en muchas otras partes del mundo, esta temperatura puede no tener sentido porque las personas están familiarizadas con la escala de temperatura Celsius.

Categorizar Este ejemplo es un simple problema de sustitución.

Sustituya la temperatura dada en la ecuación 19.2: $$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) = \frac{5}{9}(50 - 32) = 10^\circ\text{C}$$

Use la ecuación 19.1 para encontrar la temperatura Kelvin: $$T = T_C + 273.15 = 10^\circ\text{C} + 273.15 = 283\ \text{K}$$

Un conjunto de equivalentes de temperatura relacionados con el clima que conviene tener en mente es que 0°C es (literalmente) congelación a 32°F, 10°C es fresco a 50°F, 20°C es temperatura ambiente, 30°C es caliente a 86°F y 40°C es un día caluroso a 104°F.

Expansión térmica de sólidos y líquidos

coeficiente de expansión lineal promedio

$$\alpha \equiv \frac{\Delta L / L_i}{\Delta T}$$

Los experimentos demuestran que α es constante para pequeños cambios de temperatura. Para propósitos de cálculo, esta ecuación por lo general se reescribe como

$$\Delta L = \alpha L_i \, \Delta T \tag{19.4}$$

o como

$$L_f - L_i = \alpha L_i (T_f - T_i) \tag{19.5}$$

donde L_f es la longitud final, T_i y T_f son las temperaturas inicial y final, respectivamente, y la constante de proporcionalidad α es el coeficiente promedio de expansión lineal para un material determinado y tiene unidades de $(^\circ\text{C})^{-1}$.

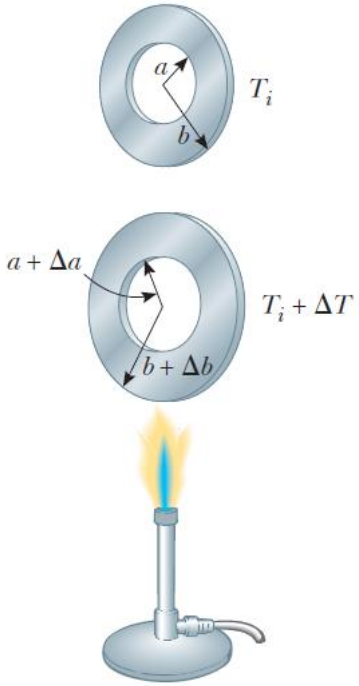


Figura 19.8 Expansión térmica de una rondana metálica homogénea. A medida que la rondana se calienta, todas las dimensiones aumentan. (La expansión está exagerada en esta figura.)

Expansión térmica de sólidos y líquidos

Ya que las dimensiones lineales de un objeto cambian con la temperatura, se sigue que el área superficial y el volumen también cambian. El cambio en volumen es proporcional al volumen inicial V_i y al cambio en temperatura de acuerdo con la relación

$$\Delta V = \beta V_i \, \Delta T \tag{19.6}$$

donde β es el **coeficiente de expansión volumétrica promedio**. Para encontrar la correspondencia entre β y α, suponga que el coeficiente de expansión lineal promedio del sólido es el mismo en todas direcciones; es decir: suponga que el material es *isotrópico*. Considere una caja sólida de dimensiones ℓ, w y h. Su volumen a cierta temperatura T_i es $V_i = \ell wh$. Si la temperatura cambia a $T_i + \Delta T$, su volumen cambia a $V_i + \Delta V$, donde cada dimensión cambia de acuerdo con la ecuación 19.4. Por lo tanto,

$$\begin{aligned} V_i + \Delta V &= (\ell + \Delta \ell)(w + \Delta w)(h + \Delta h) \\ &= (\ell + \alpha \ell \, \Delta T)(w + \alpha w \, \Delta T)(h + \alpha h \, \Delta T) \\ &= \ell wh(1 + \alpha \, \Delta T)^3 \\ &= V_i[1 + 3\alpha \, \Delta T + 3(\alpha \, \Delta T)^2 + (\alpha \, \Delta T)^3] \end{aligned}$$

Expansión térmica de sólidos y líquidos

Al dividir ambos lados por V_i y aislar el término $\Delta V/V_i$, se obtiene el cambio fraccionario en volumen:

$$\frac{\Delta V}{V_i} = 3\alpha\ \Delta T + 3(\alpha\ \Delta T)^2 + (\alpha\ \Delta T)^3$$

Puesto que $\alpha\,\Delta T << 1$ para valores representativos de ΔT ($< \sim 100°C$), se desprecian los términos $3(\alpha\ \Delta T)^2$ y $(\alpha\ \Delta T)^3$. Al hacer esta aproximación, es claro que

$$\frac{\Delta V}{V_i} = 3\alpha\ \Delta T \quad \rightarrow \quad \Delta V = (3\alpha) V_i\ \Delta T$$

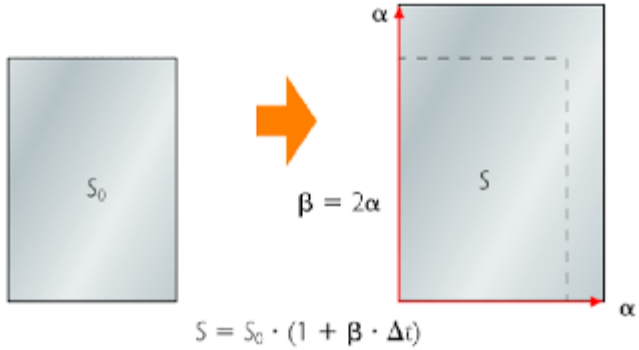
Al comparar esta expresión con la ecuación 19.6 se demuestra que

$$\beta = 3\alpha$$

En forma similar, puede demostrar que el cambio en área de una placa rectangular está dada por $\Delta A = 2\alpha A_i\,\Delta T$

EJEMPLO

Si el coeficiente de dilatación lineal del oro es de $14.2x10^{-6}$ 1/° C ¿Cuál será el coeficiente de dilatación superficial?



Expansión térmica de sólidos y líquidos

TABLA 19.1

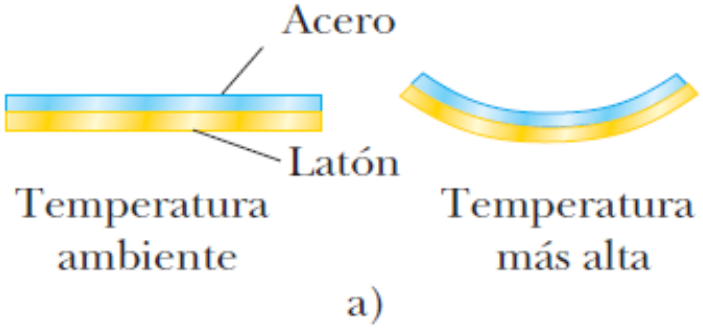
Coeficientes de expansión promedio para algunos materiales cerca de temperatura ambiente

Material	Coeficiente de expansión lineal promedio (α) $(°C)^{-1}$	Material	Coeficiente de expansión volumétrica promedio (β) $(°C)^{-1}$
Aluminio	24×10^{-6}	Alcohol, etílico	1.12×10^{-4}
Latón y bronce	19×10^{-6}	Benceno	1.24×10^{-4}
Cobre	17×10^{-6}	Acetona	1.5×10^{-4}
Vidrio (ordinario)	9×10^{-6}	Glicerina	4.85×10^{-4}
Vidrio (Pyrex)	3.2×10^{-6}	Mercurio	1.82×10^{-4}
Plomo	29×10^{-6}	Trementina	9.0×10^{-4}
Acero	11×10^{-6}	Gasolina	9.6×10^{-4}
Invar (aleación Ni–Fe)	0.9×10^{-6}	Aire[a] a 0°C	3.67×10^{-3}
Concreto	12×10^{-6}	Helio[a]	3.665×10^{-3}

[a] Los gases no tienen un valor específico para el coeficiente de expansión volumétrica porque la cantidad de expansión depende del tipo de proceso por el que pasa el gas. Los valores que se proporcionan aquí suponen que el gas experimenta una expansión a presión constante.

Pregunta rápida 19.4 Dos esferas se hacen del mismo metal y tienen el mismo radio, pero una es hueca y la otra sólida. Las esferas se someten al mismo aumento de temperatura. ¿Cuál esfera se expande más? a) La esfera sólida se expande más. b) La esfera hueca se expande más. c) Ambas se expanden en la misma cantidad. d) No hay suficiente información para decirlo.

c). Una cavidad en un material se expande en la misma forma que si estuviese lleno con dicho material.



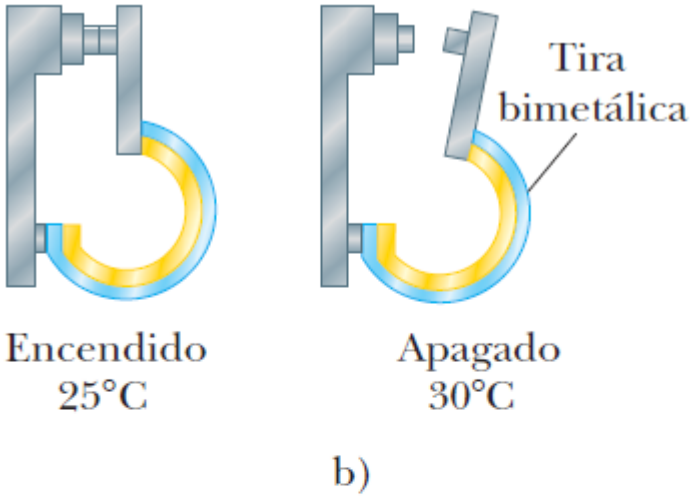
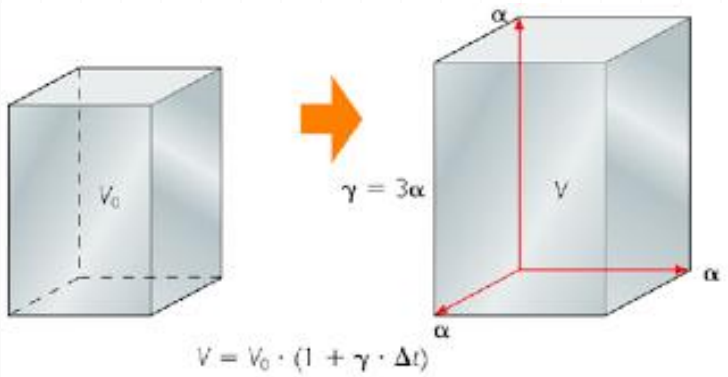


Figura 19.9 a) Una tira bimetálica se dobla a medida que la temperatura cambia, porque los dos metales tienen diferentes coeficientes de expansión. b) Una tira bimetálica usada en un termostato para interrumpir o hacer contacto eléctrico.

EJEMPLO

Un vaso de agua de 250 ml se llena con agua caliente a 70° C. ¿Cuál es el decremento en volumen si la temperatura desciende a 20° C?

Al enfriarse el agua desde la temperatura ambiente hasta 4° C, se contrae o disminuye su volumen, como es de esperarse, pero al enfriarse desde 4° C hasta el punto de congelación (0° C), el agua se expande. Inversamente cuando el agua se calienta desde 0° C hasta 4° C se contrae y, por encima de 4° C, se expande.



EJEMPLO 19.3 **El corto electrotérmico**

Un dispositivo electrónico con diseño pobre tiene dos tornillos unidos a diferentes partes del dispositivo que casi se tocan uno con otro en su interior, como en la figura 19.10. Los tornillos de acero y latón están a diferentes potenciales eléctricos y, si se tocan, se desarrollará un cortocircuito que dañará al dispositivo. (El potencial eléctrico se estudiará en el capítulo 25.) La separación inicial entre los extremos de los tornillos es de 5.0 μm a 27°C. ¿A qué temperatura se tocarán los tornillos? Suponga que la distancia entre las paredes del dispositivo no es afectada por el cambio de temperatura.

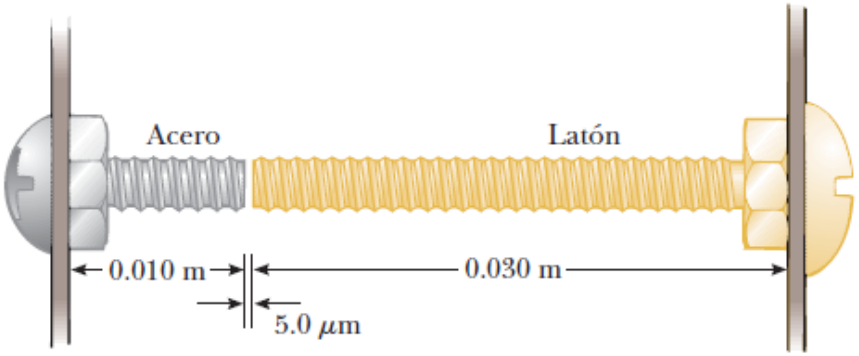


Figura 19.10 (Ejemplo 19.3) Dos tornillos unidos a diferentes partes de un dispositivo eléctrico casi se tocan cuando la temperatura es de 27°C. A medida que la temperatura aumenta, los extremos de los tornillos se mueven uno hacia el otro.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine que los extremos de ambos tornillos se expanden en el espacio que hay entre ellos a medida que aumenta la temperatura.

Categorizar Este ejemplo se clasifica como un problema de expansión térmica en el que la *suma* de los cambios en longitud de los dos tornillos debe ser igual a la longitud de la separación inicial entre los extremos.

Analizar Establezca la suma de los cambios de longitud igual al ancho de la separación:

$$\Delta L_{\text{lat}} + \Delta L_{\text{ac}} = \alpha_{\text{lat}} L_{i,\text{lat}}\, \Delta T + \alpha_{\text{ac}} L_{i,\text{ac}}\, \Delta T = 5.0 \times 10^{-6}\ \text{m}$$

Resuelva para ΔT:

$$\Delta T = \frac{5.0 \times 10^{-6}\ \text{m}}{\alpha_{\text{lat}} L_{i,\text{lat}} + \alpha_{\text{ac}} L_{i,\text{ac}}}$$

$$= \frac{5.0 \times 10^{-6}\ \text{m}}{[19 \times 10^{-6}(^\circ\text{C})^{-1}](0.030\ \text{m}) + [11 \times 10^{-6}(^\circ\text{C})^{-1}](0.010\ \text{m})} = 7.4^\circ\text{C}$$

Encuentre la temperatura a la que se tocan los tornillos:

$$T = 27^\circ\text{C} + 7.4^\circ\text{C} = \boxed{34^\circ\text{C}}$$

Finalizar Esta temperatura es posible si el acondicionamiento de aire en el alojamiento del dispositivo falla durante un largo periodo de tiempo en un día de verano muy caliente.

El inusual comportamiento del agua

Por lo general los líquidos aumentan en volumen con temperatura creciente y tienen coeficientes de expansión volumétrica promedio alrededor de diez veces mayores que los sólidos. El agua fría es una excepción a esta regla, como puede ver en la curva de densidad con temperatura, que se muestra en la figura 19.11. A medida que la temperatura aumenta de 0°C a 4°C, el agua se contrae y por lo tanto su densidad aumenta. Arriba de 4°C, el agua se expande con temperatura creciente y así su densidad disminuye. En consecuencia, la densidad del agua alcanza un valor máximo de 1.000 g/cm^3 a 4°C.

Este inusual comportamiento de expansión térmica del agua sirve para explicar por qué un estanque empieza a congelarse en la superficie, en lugar de hacerlo en el fondo. Cuando la temperatura del aire cae de, por ejemplo, 7°C a 6°C, el agua superficial también se enfría y en consecuencia disminuye en volumen. Como resultado, el agua de la superficie se hunde y agua más caliente de abajo se fuerza a la superficie para enfriarse. Sin embargo, cuando la temperatura del aire está entre 4°C y 0°C, el agua de la superficie se expande mientras se enfría y se vuelve menos densa que el agua bajo ella. El proceso de mezcla se detiene y al final el agua de la superficie se congela. A medida que el agua se congela, el hielo permanece en la superficie porque el hielo es menos denso que el agua. El hielo continúa acumulándose en la superficie, mientras que el agua cercana al fondo permanece a 4°C. Si éste no fuese el caso, los peces y otras formas de vida marina no sobrevivirían.

El inusual comportamiento del agua

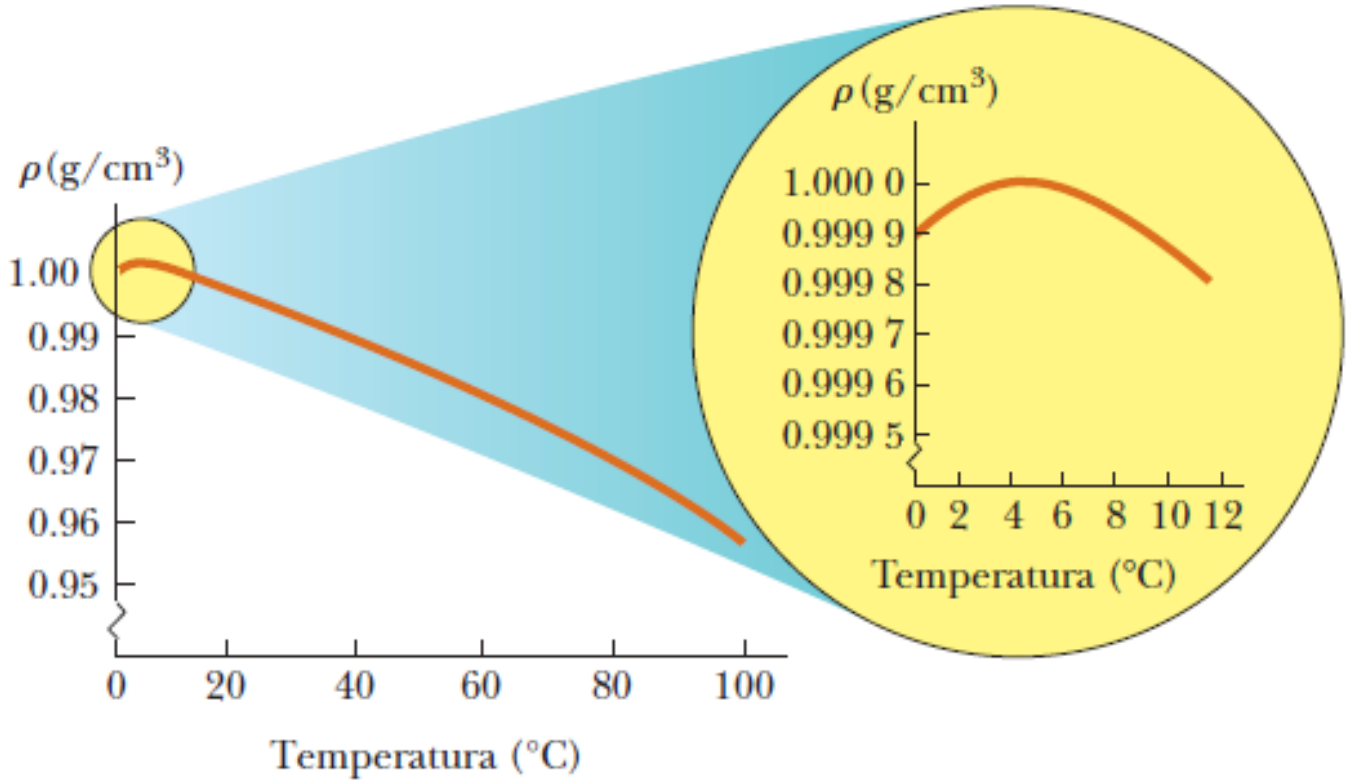


Figura 19.11 Variación de la densidad del agua a presión atmosférica con la temperatura. La inserción a la derecha muestra que la densidad máxima del agua se presenta a 4°C.

Descripción macroscópica de un gas ideal

La ecuación de expansión volumétrica $\Delta V = \beta V_i \Delta T$ es de acuerdo con la suposición de que el material tiene un volumen inicial V_i antes de que se presente un cambio de temperatura. Tal es el caso para sólidos y líquidos porque tienen volumen fijo a una temperatura determinada.

El caso para gases es por completo diferente.

ecuación de estado para un gas ideal: $PV = nRT$

gas de densidad baja se refiere como un **gas ideal**

$R = 8.314\,\mathrm{J/mol \cdot K}$

constante universal de los gases

Un **mol** de cualquier sustancia es aquella cantidad de la sustancia que contiene un **número de Avogadro** $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ de partículas constituyentes (átomos o moléculas). El número de moles n de una sustancia se relaciona con su masa m a través de la expresión

$$n = \frac{m}{M}$$

donde M es la masa molar de la sustancia. La masa molar de cada elemento químico es la masa atómica (de la tabla periódica; consulte el apéndice C) expresada en gramos por cada mol. Por ejemplo, la masa de un átomo de He es 4.00 u (unidades de masa atómica), así que la masa molar del He es 4.00 g/mol.

la presión se expresa en pascales (1 Pa = 1 $\mathrm{N/m^2}$) y el volumen en metros cúbicos

Descripción macroscópica de un gas ideal

La ley de gas ideal con frecuencia se expresa en términos del número total de moléculas N. Puesto que el número de moles n es igual a la razón del número total de moléculas y el número de Avogadro N_A, la ecuación 19.8 se escribe como

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT$$

$$PV = Nk_B T$$

donde k_B es la **constante de Boltzmann**, que tiene el valor

$$k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K}$$

Es común llamar a cantidades tales como P, V y T **variables termodinámicas** de un gas ideal.

Si la ecuación de estado se conoce, una de las variables siempre se expresa como alguna función de las otras dos.

Pregunta rápida 19.5 Un material común para acolchar objetos en los paquetes está hecho de burbujas de aire atrapadas entre hojas de plástico. Este material es más efectivo para evitar que los contenidos del paquete se muevan dentro del empaque en a) un día caliente, b) un día frío, c) días calientes o fríos.

19.5 a). En un día frío, el aire atrapado en las burbujas se reduce en presión de acuerdo con la ley de gas ideal. Por lo tanto, el volumen de las burbujas puede ser menor que en un día cálido y los contenidos del paquete se pueden mover más.

Pregunta rápida 19.6 En un día de invierno enciende su horno y la temperatura del aire dentro de su casa aumenta. Suponga que su casa tiene la cantidad normal de fuga entre el aire interior y el aire exterior. ¿El número de moles de aire en su habitación a la temperatura más alta a) es mayor que antes, b) menor que antes o c) igual que antes?

19.6 b). Debido al aumento de temperatura, el aire se expande. En consecuencia, parte del aire se fuga hacia el exterior, lo que deja menos aire en la casa.

EJEMPLO 19.4 **Calentamiento de una lata de aerosol**

Una lata de aerosol que contiene un gas propelente al doble de la presión atmosférica (202 kPa) y que tiene un volumen de 125.00 cm^3 está a 22°C. Después se lanza a un fuego abierto. Cuando la temperatura del gas en la lata alcanza 195°C, ¿cuál es la presión dentro de la lata? Suponga que cualquier cambio en el volumen de la lata es despreciable.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Por intuición cabe esperar que la presión del gas en el contenedor aumente debido a la temperatura creciente.

Categorizar El gas en la lata se modela como ideal y se usa la ley del gas ideal para calcular la nueva presión.

Analizar Reordene la ecuación 19.8:

$$1) \quad \frac{PV}{T} = nR$$

No escapa aire durante la compresión, de modo que n, y por lo tanto nR, permanecen constantes. Por ende, establezca el valor inicial del lado izquierdo de la ecuación 1) igual al valor final:

$$2) \quad \frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f}$$

Ya que los volúmenes inicial y final del gas se suponen iguales, cancele los volúmenes:

$$3) \quad \frac{P_i}{T_i} = \frac{P_f}{T_f}$$

Resuelva para P_f:

$$P_f = \left(\frac{T_f}{T_i}\right) P_i = \left(\frac{468\ \text{K}}{295\ \text{K}}\right)(202\ \text{kPa}) = 320\ \text{kPa}$$

Finalizar Mientras más alta sea la temperatura, mayor será la presión que ejerza el gas atrapado, como se esperaba. Si la presión aumenta lo suficiente, la lata puede explotar. Debido a esta posibilidad, nunca debe desechar las latas de aerosol en el fuego.

¿Qué pasaría si? Suponga que se incluye un cambio de volumen debido a expansión térmica de la lata de acero a medida que aumenta la temperatura. ¿Esto altera significativamente la respuesta para la presión final?

Respuesta Ya que el coeficiente de expansión térmica del acero es muy pequeño, no se espera un gran efecto en la respuesta final.

Resumen

DEFINICIONES

Dos objetos están en **equilibrio térmico** mutuo si no intercambian energía cuando están en contacto térmico.

La **temperatura** es la propiedad que determina si un objeto está en equilibrio térmico con otros objetos. **Dos objetos en equilibrio térmico mutuo están a la misma temperatura.** La unidad del SI de temperatura absoluta es el **kelvin**, que se define como 1/273.16 de la diferencia entre cero absoluto y la temperatura del punto triple del agua.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La **ley cero de la termodinámica** establece que si los objetos A y B están por separado en equilibrio térmico con un tercer objeto C, por lo tanto los objetos A y B están en equilibrio térmico mutuo.

Cuando la temperatura de un objeto se cambia por una cantidad ΔT, su longitud cambia por una cantidad ΔL que es proporcional a ΔT y a su longitud inicial L_i:

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T \tag{19.4}$$

Donde la constante α es el **coeficiente de expansión lineal promedio**. El **coeficiente de expansión volumétrica promedio** β para un sólido es aproximadamente igual a 3α.

Un **gas ideal** es aquel para el cual PV/nT es constante. Un gas ideal se describe mediante la **ecuación de estado**,

$$PV = nRT \tag{19.8}$$

donde n es igual al número de moles del gas, P es su presión, V su volumen, R la constante universal de los gases (8.314 J/mol·K) y T la temperatura absoluta del gas. Un gas real se comporta casi como un gas ideal si tiene una densidad baja.

Curso de Física Avanzada

- Temperatura
- Primera ley de la termodinámica
- Teoría cinética de los gases
- Máquinas térmicas, entropía y segunda ley de la termodinámica

Primera ley de la termodinámica

- Calor y energía interna
- Calor específico y calorimetría
- Calor latente
- Trabajo y calor en procesos termodinámicos
- Primera ley de la termodinámica
- Algunas aplicaciones de la primera ley de la termodinámica
- Mecanismos de transferencia de energía

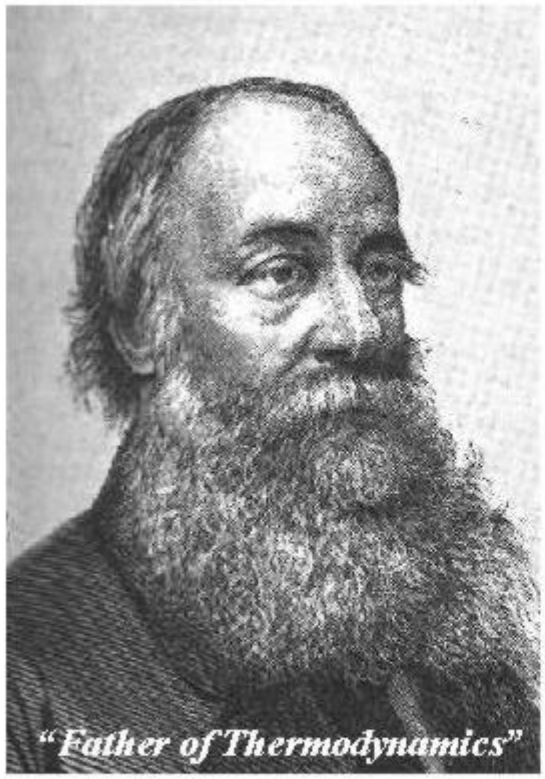
Primera ley de la termodinámica

Hasta alrededor de 1850, los campos de la termodinámica y la mecánica se consideraban como dos ramas distintas de la ciencia. La ley de conservación de la energía parecía describir únicamente ciertos tipos de sistemas mecánicos. Sin embargo, los experimentos de mediados del siglo XIX, realizados por el inglés James Joule y otros, demostraron una fuerte conexión entre la transferencia de energía mediante calor en los procesos térmicos y la transferencia de energía por trabajo en los procesos mecánicos. En la actualidad se sabe que la energía mecánica se transforma en energía interna, la cual encuentra su definición formal en este capítulo. Una vez que el concepto de energía se generalizó, a partir de la mecánica, para incluir la energía interna, la ley de conservación de la energía surgió como una ley universal de la naturaleza.

JAMES PRESCOTT JOULE

1818 - 1889

Physics
Thermodynamics



- Proved the conservation of energy: 1st Law of TD
- Discovered the mechanical equivalent of heat
- Joule-Thomson Effect the basis of refrigeration

- Joule's Law of electricity

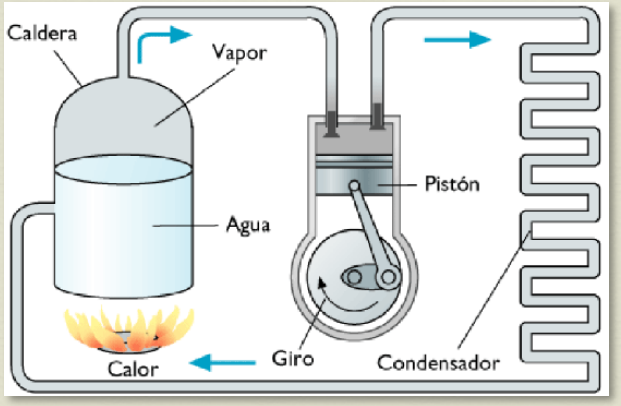
power dissipated as heat = resistance x current^2

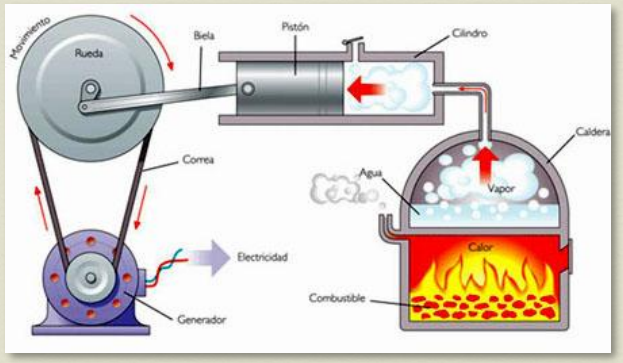
- Unit of energy, the *joule*, named in his honor
- A businessman, he made his discoveries as a hobby

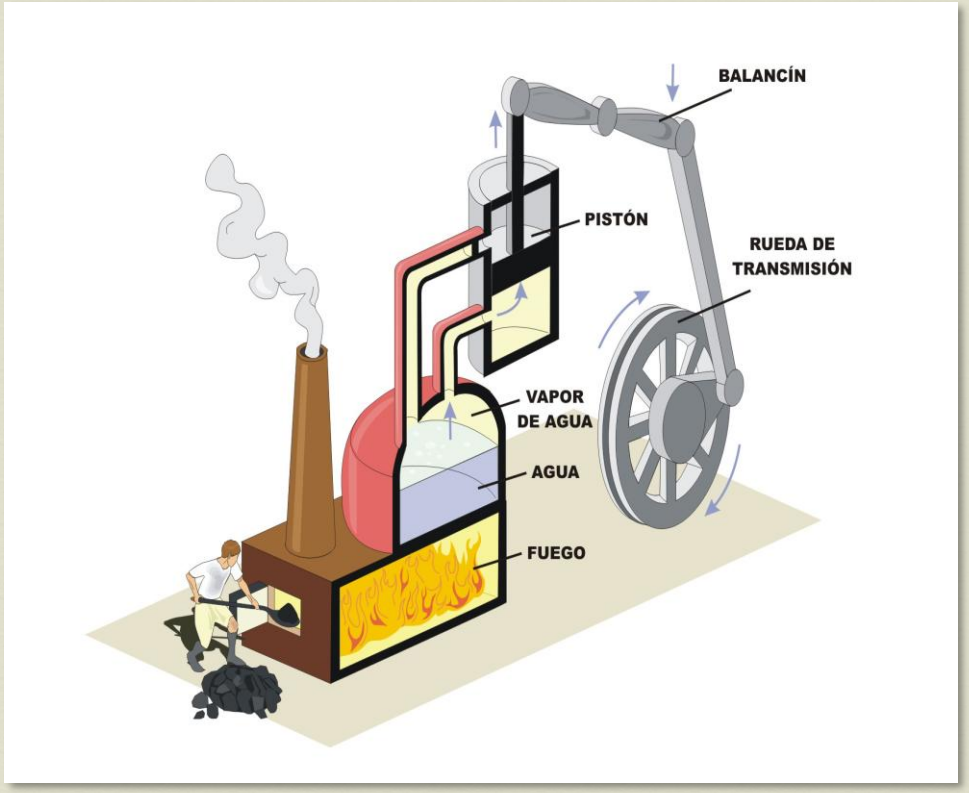
". . . Conservation of energy, the most basic and universal of all scientific laws. It is surely appropriate that the privilege of making such a vital discovery was given by God to a man of sincere Christian faith."

– Dr. Henry M. Morris

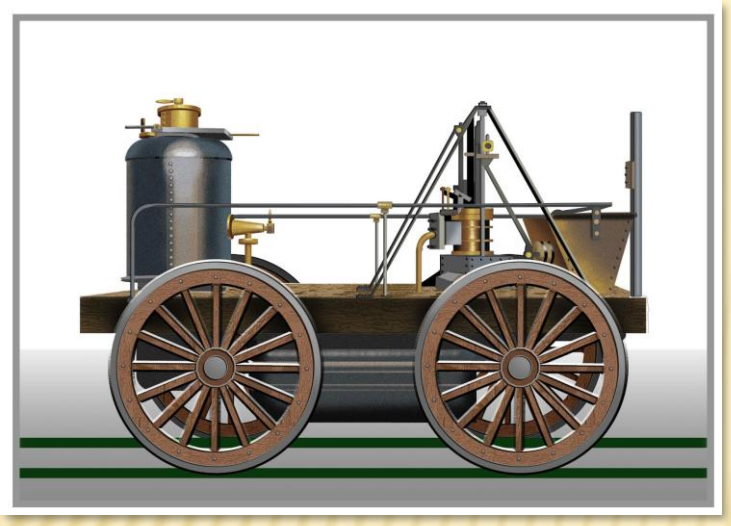
Máquina de Vapor

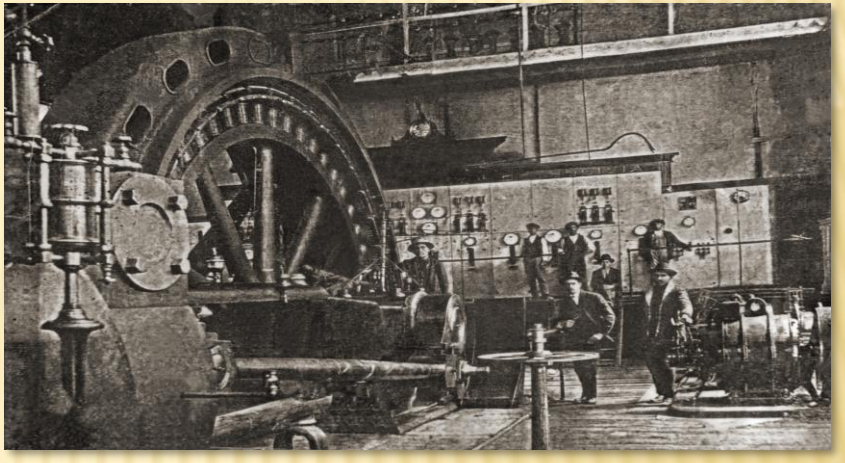






Máquina de Vapor

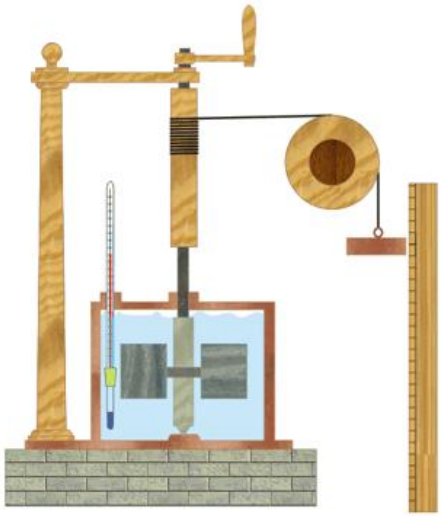




Calor y energía interna

La energía interna es toda la energía de un sistema que se asocia con sus componentes microscópicos, átomos y moléculas, cuando se ve desde un marco de referencia en reposo respecto del centro de masa del sistema.

El calor es la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debida a una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores.



$$1\ \text{cal} = 4.186\ \text{J}$$

JAMES PRESCOTT JOULE
(1818–1889)

El equivalente mecánico del calor

EJEMPLO 20.1 Pérdida de peso por el camino difícil

Un estudiante ingiere alimentos calificados en 2 000 Calorías. Él quiere hacer una cantidad equivalente de trabajo en el gimnasio y levanta una barra de 50.0 kg. ¿Cuántas veces debe levantar la barra para gastar toda esta energía? Suponga que él levanta la barra 2.00 m cada vez que la eleva y no vuelve a ganar energía cuando baja la barra.

SOLUCIÓN

Analizar Reduzca la ecuación de conservación de energía, ecuación 8.2, a la expresión adecuada para el sistema de la barra y la Tierra:

$$1) \quad \Delta U_{\text{total}} = W_{\text{total}}$$

Exprese el cambio en energía potencial gravitacional del sistema después de que la barra se eleva una vez:

$$\Delta U = mgh$$

Exprese la cantidad de energía total que debe transferirse al sistema mediante trabajo por levantar la barra n veces, si supone que no vuelve a ganar energía cuando la barra se baja:

$$2) \quad \Delta U_{\text{total}} = nmgh$$

Sustituya la ecuación 2) en la ecuación 1):

$$nmgh = W_{\text{total}}$$

Resuelva para n:

$$n = \frac{W_{\text{total}}}{mgh}$$

$$= \frac{(2\,000\ \text{Cal})}{(50.0\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)(2.00\ \text{m})}\left(\frac{4.186\ \text{J}}{1\ \text{cal}}\right)$$

$$= 8.54 \text{ veces}$$

Finalizar Si el estudiante está en buena forma y levanta la barra una vez cada 5 s, le tomará aproximadamente 12 h realizar esta proeza. Es claro, resulta mucho más fácil que el estudiante pierda peso mediante una dieta.

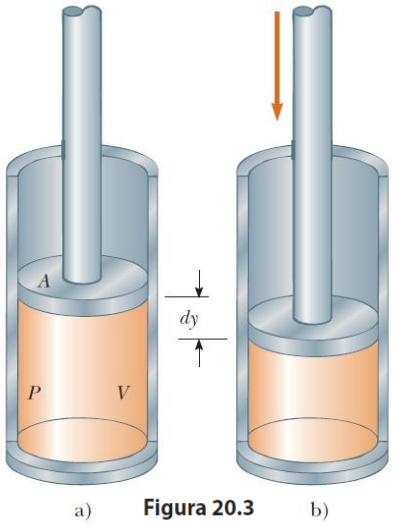
Trabajo y calor en procesos termodinámicos

Considere un gas contenido en un cilindro ajustado con un pistón móvil (figura 20.3). En equilibrio, el gas ocupa un volumen V y ejerce una presión uniforme P sobre las paredes del cilindro y sobre el pistón. Si el pistón tiene un área de sección transversal A, la fuerza ejercida por el gas sobre el pistón es $F = PA$.

$$dW = \vec{\mathbf{F}} \cdot d\vec{\mathbf{r}} = -F\hat{\mathbf{j}} \cdot dy\hat{\mathbf{j}} = -F\,dy = -PA\,dy$$

donde la magnitud F de la fuerza externa es igual a PA porque el pistón siempre está en equilibrio entre la fuerza externa y la fuerza del gas. Se supone que la masa del pistón es despreciable en esta explicación. Dado que $A\,dy$ es el cambio en volumen del gas dV, el trabajo realizado sobre el gas se expresa como

$$dW = -P\,dV$$



a) **Figura 20.3** b)

Si el gas se comprime, dV es negativo y el trabajo invertido en el gas es positivo. Si el gas se expande, dV es positivo y el trabajo invertido en el gas es negativo. Si el volumen permanece al máximo, el trabajo invertido en el gas es cero. El trabajo total invertido en el gas a medida que su volumen cambia de V_i a V_f se conoce por la integral

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P\,dV$$

◀ Trabajo invertido en un gas

Para evaluar esta integral, debe conocer cómo varía la presión con el volumen durante el proceso.

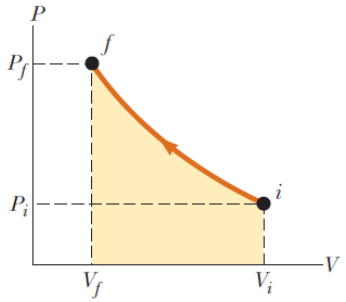


Figura 20.4 Se comprime un gas cuasi estáticamente (con lentitud) desde el estado i hasta el estado f. El trabajo invertido sobre el gas es igual al negativo del área bajo la curva PV. El volumen disminuye, así que esta área es negativa. Por lo tanto el trabajo invertido sobre el gas es positivo.

Para el proceso de comprimir un gas en un cilindro, el trabajo consumido depende de la trayectoria particular que toma entre los estados inicial y final

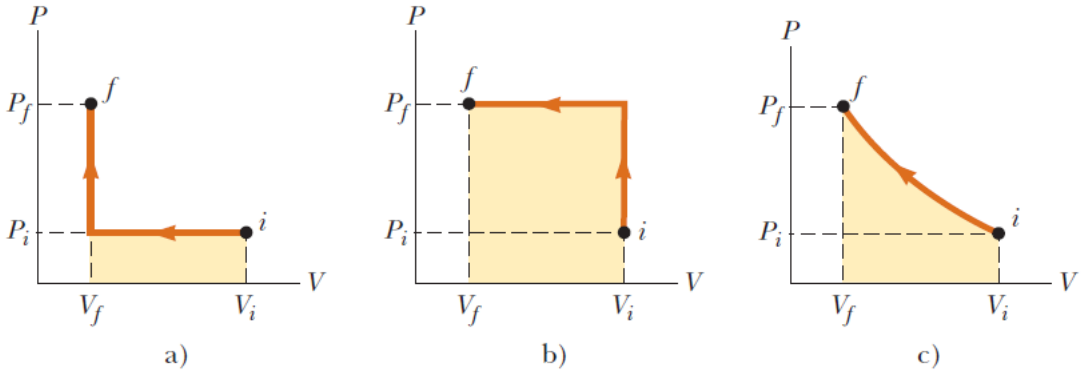


Figura 20.5 El trabajo invertido en un gas a medida que se lleva de un estado inicial a un estado final depende de la trayectoria entre dichos estados.

En el proceso que se exhibe en la figura 20.5a, el volumen del gas primero se reduce de V_i a V_f a presión constante P_i y la presión del gas después aumenta de P_i a P_f al calentar a volumen constante V_f. El trabajo invertido en el gas a lo largo de esta trayectoria es $-P_i(V_f - Vi)$. En la figura 20.5b, la presión del gas aumenta de P_i a P_f a volumen constante V_i y enseguida el volumen del gas se reduce de V_i a V_f a presión constante P_f. El trabajo invertido en el gas es $-P_f(V_f - V_i)$. Este valor es mayor que el del proceso descrito en la figura 20.5a, porque el pistón se movió a través del mismo desplazamiento mediante una fuerza considerable. Por último, para el proceso descrito en la figura 20.5c, donde tanto P como V cambian de manera continua, el trabajo invertido en el gas tiene algún valor entre los obtenidos en los primeros dos procesos.

Primera ley de la termodinámica

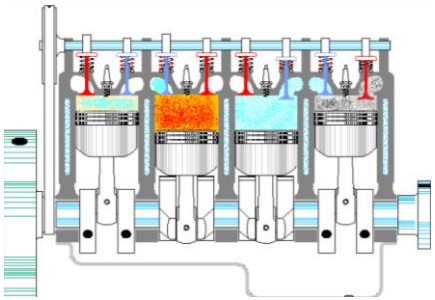
$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$$

◀ Primera ley de la termodinámica

Cuando un sistema se somete a un cambio infinitesimal de estado en el que una cantidad pequeña de energía dQ se transfiere mediante calor y una cantidad pequeña de trabajo dW se invierte, la energía interna cambia en una cantidad pequeña dE_{int}. Debido a eso para procesos infinitesimales es posible expresar la primera ley como

$$dE_{\text{int}} = dQ + dW$$

Un **proceso adiabático** es aquel durante el cual no entra ni sale energía del sistema por calor; $Q = 0$



$$\Delta E_{\text{int}} = W \text{ (proceso adiabático)}$$

Este resultado muestra que si un gas se comprime adiabáticamente de modo que W sea positivo, en tal caso ΔE_{int} es positivo y la temperatura del gas aumenta. Por lo contrario, la temperatura de un gas disminuye cuando el gas se expande adiabáticamente.

Primera ley de la termodinámica

A continuación se investigan algunos casos especiales en los que se aplica la primera ley. Primero, considere un *sistema aislado*, que no interactúa con sus alrededores. En este caso, no tiene lugar la transferencia de energía por calor y el trabajo consumido en el sistema es cero; por tanto, la energía interna permanece constante. Es decir, ya $Q = W = 0$, se sigue que $\Delta E_{int} = 0$; en consecuencia, $E_{int,i} = E_{int,f}$. Se concluye que **la energía interna E_{int} de un sistema aislado permanece constante**.

A continuación, considere el caso de un sistema que intercambia energía con sus alrededores y se lleva a través de un **proceso cíclico**, que comienza y termina en el mismo estado. En este caso, el cambio en la energía interna de nuevo debe ser cero porque E_{int} es una variable de estado; por lo tanto, la energía Q agregada al sistema debe ser igual al negativo del trabajo W consumido en el sistema durante el ciclo. Es decir, en un proceso cíclico,

$$\Delta E_{int} = 0 \text{ y } Q = -W \text{ (proceso cíclico)}$$

En un diagrama *PV*, un proceso cíclico aparece como una curva cerrada. (Los procesos descritos en la figura 20.5 se representan mediante curvas abiertas, porque los estados inicial y final difieren.) Se puede demostrar que, **en un proceso cíclico, el trabajo neto invertido en el sistema por cada ciclo es igual al área encerrada por la trayectoria que representa el proceso en un diagrama *PV*.**

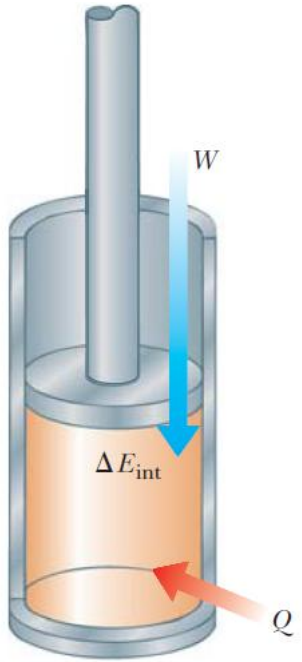


Figura 20.7 La primera ley de la termodinámica iguala el cambio en energía interna E_{int} en un sistema con la transferencia de energía neta al sistema mediante calor Q y trabajo W. En la situación que se muestra aquí, la energía interna del gas aumenta.

Primera ley de la termodinámica

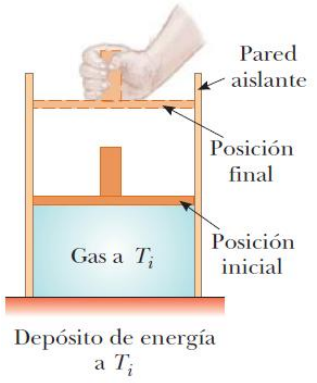


Figura 20.6

En la figura 20.6a, el gas se aísla térmicamente de sus alrededores, excepto en el fondo de la región llena por el gas, donde está en contacto térmico con un depósito de energía. Un *depósito de energía* es una fuente de energía que se considera tan grande que una transferencia de energía finita hacia o desde el depósito no cambia su temperatura. El pistón se mantiene en su posición inicial mediante un agente externo, como una mano. Cuando la fuerza que mantiene al pistón se reduce un poco, el pistón se eleva con lentitud a su posición final. Ya que el pistón se mueve hacia arriba, el gas hace trabajo sobre el pistón. Durante esta expansión al volumen final V_f, se transfiere la suficiente energía por calor del depósito al gas, para mantener una temperatura constante T_i.

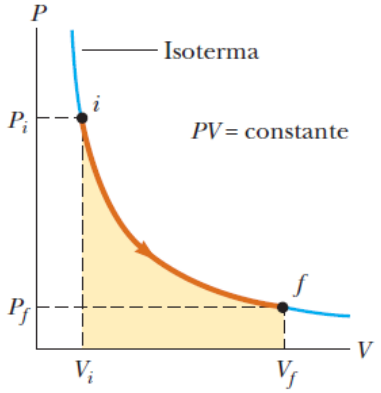
Ahora considere el sistema por completo térmicamente aislado, que se muestra en la figura 20.6b. Cuando la membrana se rompe, el gas se expande rápidamente en el vacío hasta que ocupa un volumen V_f y está a una presión P_f. En este caso, el gas no realiza trabajo porque no aplica una fuerza; no se requiere fuerza para expandirlo en un vacío. Además, no se transfiere energía mediante calor a través de la pared aislante.

Los estados inicial y final del gas ideal en la figura 20.6a son idénticos a los estados inicial y final de la figura 20.6b, pero las trayectorias son diferentes. En el primer caso, el gas realiza trabajo sobre el pistón y se transfiere energía lentamente al gas mediante calor. En el segundo caso, no se transfiere energía mediante calor y el valor del trabajo invertido es cero.

Por lo tanto, **la transferencia de energía por calor, como el trabajo invertido, depende de los estados inicial, final e intermedio del sistema**.

Expansión isotérmica de un gas ideal

Suponga que le permite a un gas ideal expandirse cuasi estáticamente a temperatura constante. Este proceso se describe mediante el diagrama PV que se muestra en la figura La curva es una hipérbola, y la ley de gas ideal con T constante indica que la ecuación de esta curva es $PV =$ constante.



$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P\,dV = -\int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V}\,dV$$

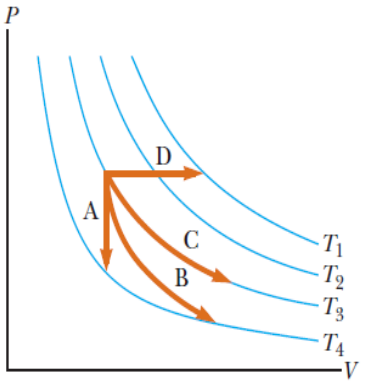
Ya que T es constante en este caso, se puede retirar de la integral junto con n y R:

$$W = -nRT\int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = -nRT \ln V\Big|_{V_i}^{V_f}$$

Para evaluar la integral, use $\int (dx/x) = \ln x$.

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right)$$

En términos numéricos, este trabajo W es igual al negativo del área sombreada bajo la curva PV que se exhibe en la figura Porque el gas se expande, $V_f > V_i$ y el valor para el trabajo consumido en el gas es negativo, como se esperaba. Si el gas se comprime, en tal caso $V_f < V_i$ y el trabajo consumido en el gas es positivo.



Identifique la naturaleza de las trayectorias A, B, C y D.

Pregunta rápida Caracterice las trayectorias en la figura como isobárica, isovolumétrica, isotérmica o adiabática. Para la trayectoria B, $Q = 0$.

EJEMPLO Una expansión isotérmica

Una muestra de 1.0 mol de un gas ideal se mantiene a 0.0°C durante una expansión de 3.0 L a 10.0 L.

A) ¿Cuánto trabajo se gasta en el gas durante la expansión?

B) ¿Cuánta transferencia de energía por calor se presenta entre el gas y sus alrededores en este proceso?

C) Si el gas regresa al volumen original mediante un proceso isobárico, ¿cuánto trabajo se consume en el gas?

SOLUCIÓN

A)

Sustituya los valores conocidos en la ecuación:

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right)$$

$$= (1.0\ \text{mol})(8.31\ \text{J/mol}\cdot\text{K})(273\ \text{K}) \ln\left(\frac{3.0\ \text{L}}{10.0\ \text{L}}\right)$$

$$= -2.7 \times 10^3\ \text{J}$$

B)

Encuentre el calor a partir de la primera ley:

$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$$

$$0 = Q + W$$

$$Q = -W = 2.7 \times 10^3\ \text{J}$$

C)

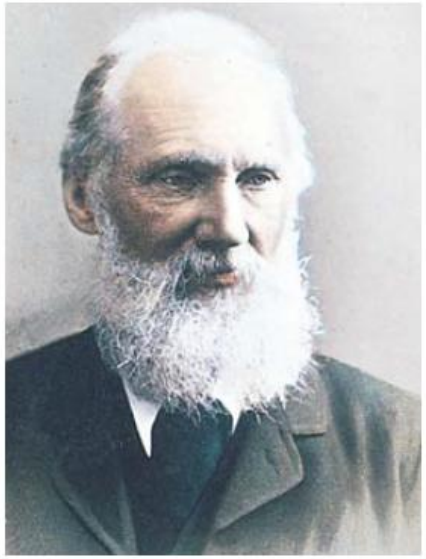
La presión no se proporciona, así que incorpore la ley de gas ideal:

$$W = -P(V_f - V_i) = -\frac{nRT_i}{V_i}(V_f - V_i)$$

$$= -\frac{(1.0\ \text{mol})(8.31\ \text{J/mol}\cdot\text{K})(273\ \text{K})}{10.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3}(3.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3 - 10.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^3)$$

$$= 1.6 \times 10^3\ \text{J}$$

Máquinas térmicas, entropía y segunda ley de la termodinámica



LORD KELVIN
Físico y matemático británico
(1824–1907)
William Thomson nació en Belfast, conocido como Kelvin fue el primero en proponer el uso de una escala absoluta de temperatura. La escala de temperatura Kelvin se nombró así en su honor. El trabajo de Kelvin en termodinámica condujo a la idea de que la energía no puede pasar espontáneamente de un objeto más frío a un objeto más caliente.

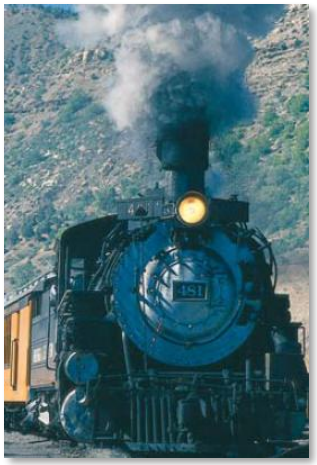
Una **máquina térmica** es un dispositivo que toma energía por calor y, al funcionar en un proceso cíclico, expulsa una fracción de dicha energía mediante trabajo.

Una maquina térmica lleva alguna sustancia de trabajo a través de un proceso cíclico durante el que

1) La sustancia de trabajo absorbe energía por calor de un deposito de energía a alta temperatura.

2) La maquina consume trabajo.

3) Se expulsa energía por calor a un deposito a temperatura mas baja.



TREN DE VAPOR:

1) El agua en una caldera absorbe energía de la quema de combustible y la convierte en vapor.
2) El vapor realiza trabajo al expandirse contra un pistón.

3) Después el vapor se enfría y condensa, el agua liquida producida regresa a la caldera y el ciclo se repite.

Máquinas térmicas y segunda ley de la termodinámica

Ya que la sustancia de trabajo pasa a través de un ciclo, sus energías internas inicial y final son iguales: $\Delta E_{\text{int}} = 0$. Por lo tanto, a partir de la primera ley de la termodinámica, $\Delta E_{\text{int}} = Q + W = Q - W_{\text{máq}} = 0$

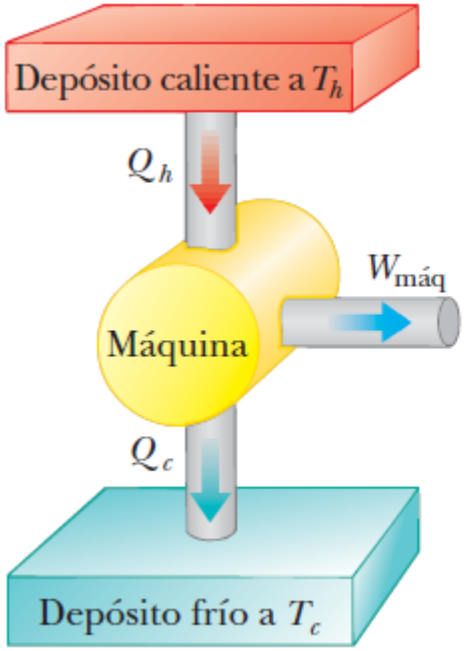


Figura 22.2 Representación esquemática de una máquina térmica. La máquina realiza trabajo $W_{\text{máq}}$. La flecha en la parte superior representa energía $Q_h > 0$ que entra a la máquina. En el fondo, $Q_c < 0$ representa la energía que sale de la máquina.

El trabajo neto $W_{\text{máq}}$ realizado por una máquina térmica es igual a la energía neta Q_{neta} que se le transfiere.

$$Q_{\text{neta}} = |Q_h| - |Q_c|; \text{ por lo tanto,}$$
$$W_{\text{máq}} = |Q_h| - |Q_c|$$

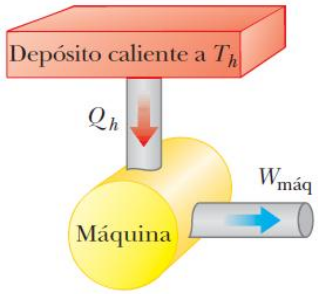
Eficiencia Térmica

La **eficiencia térmica** e de una máquina térmica se define como la relación del trabajo neto invertido por la máquina durante un ciclo, a la entrada de energía a la mayor temperatura durante el ciclo:

Eficiencia térmica de una máquina térmica

$$e \equiv \frac{W_{\text{máq}}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}$$

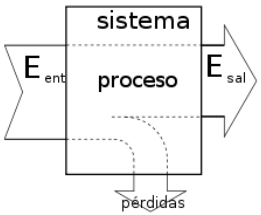
Por ejemplo, un buen motor de automóvil tiene una eficiencia aproximada de 20%, y los motores diesel tienen eficiencias que varían de 35% a 40%.



La máquina imposible

forma de Kelvin–Planck de la segunda ley de la termodinámica establece lo siguiente:

Es imposible construir una máquina térmica que, funcionando en un ciclo, no produzca otro efecto que la entrada de energía por calor de un depósito y la realización de una cantidad igual de trabajo.



EJEMPLO La eficiencia de una máquina

Una máquina transfiere 2.00×10^3 J de energía de un depósito caliente durante un ciclo y transfiere 1.50×10^3 J conforme expulsa a un depósito frío.

A) Encuentre la eficiencia de la máquina.

B) ¿Cuánto trabajo realiza esta máquina en un ciclo?

SOLUCIÓN

A)

Encuentre la eficiencia de la máquina a partir de la ecuación:

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{1.50 \times 10^3\,\text{J}}{2.00 \times 10^3\,\text{J}} = 0.250, \text{ o } 25.0\%$$

B)

Encuentre el trabajo realizado por la máquina al tomar la diferencia entre las energías de entrada y de salida:

$$W_{\text{máq}} = |Q_h| - |Q_c| = 2.00 \times 10^3\,\text{J} - 1.50 \times 10^3\,\text{J}$$
$$= 5.0 \times 10^2\,\text{J}$$

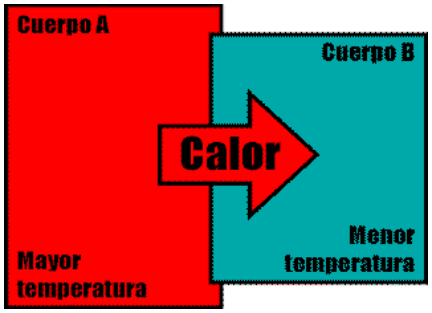
¿Qué pasaría si? Suponga que se le pregunta por la potencia de salida de la máquina. ¿Tiene suficiente información para responder?

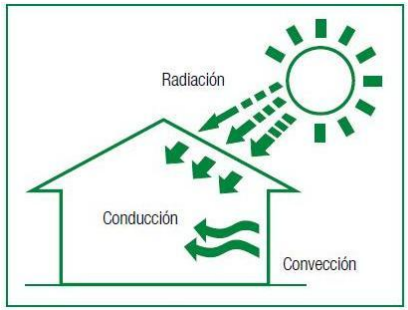
Respuesta No, no tiene suficiente información. La potencia de una máquina es la *rapidez* a la que realiza trabajo. Sabe cuánto trabajo se realiza por ciclo, pero no tiene información acerca del intervalo de tiempo asociado con un ciclo. Sin embargo, si se le dijera que la máquina opera a 2 000 rpm (revoluciones por minuto), podría relacionar esta proporción con el periodo de rotación T del mecanismo de la máquina. Si supone que hay un ciclo termodinámico por revolución, la potencia es

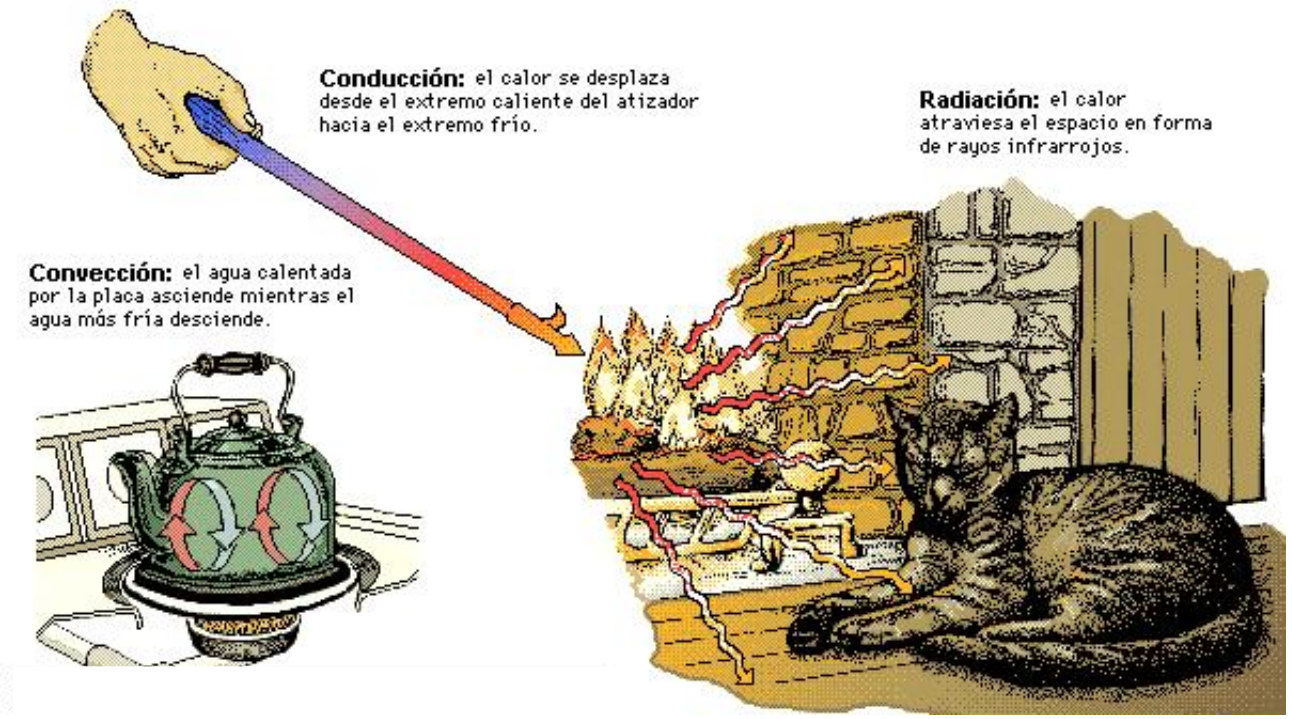
$$\mathcal{P} = \frac{W_{\text{máq}}}{T} = \frac{5.0 \times 10^2\,\text{J}}{\left(\frac{1}{2\,000}\ \text{min}\right)}\left(\frac{1\ \text{min}}{60\ \text{s}}\right) = 1.7 \times 10^4\,\text{W}$$

Transferencia de Calor

LEY CERO







CONDUCCIÓN

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción.

CONVECCIÓN

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección.

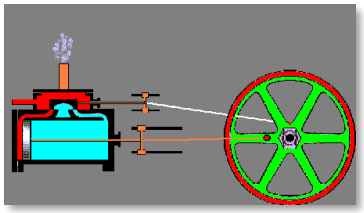
RADIACIÓN

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

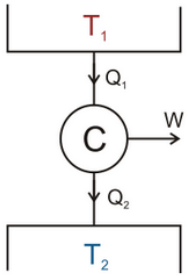
El Ciclo de Carnot

SADI CARNOT
Ingeniero francés (1796–1832)
Carnot fue el primero en demostrar la relación cuantitativa entre trabajo y calor. En 1824 publicó su única obra, *Reflexiones acerca del poder motriz del calor*, que revisaba la importancia industrial, política y económica de la máquina de vapor.

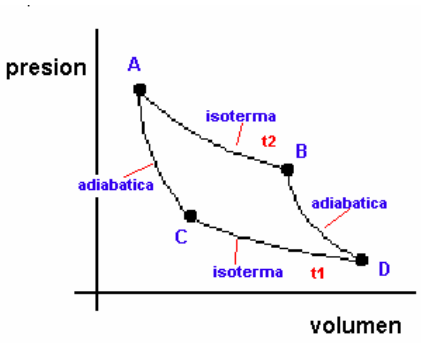
El ciclo de Carnot se produce cuando un equipo que trabaja absorbiendo una cantidad de calor Q_1 de la fuente de alta temperatura, cede un calor Q_2 a la de baja temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior.
El rendimiento viene definido por:

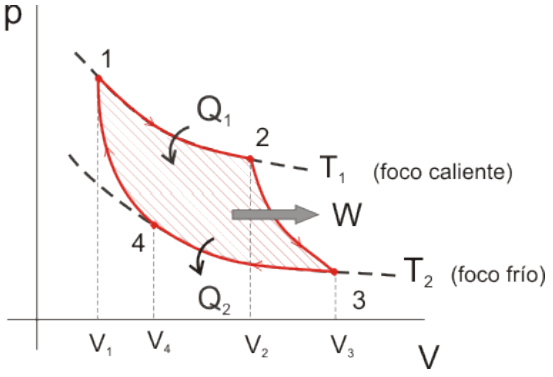


$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

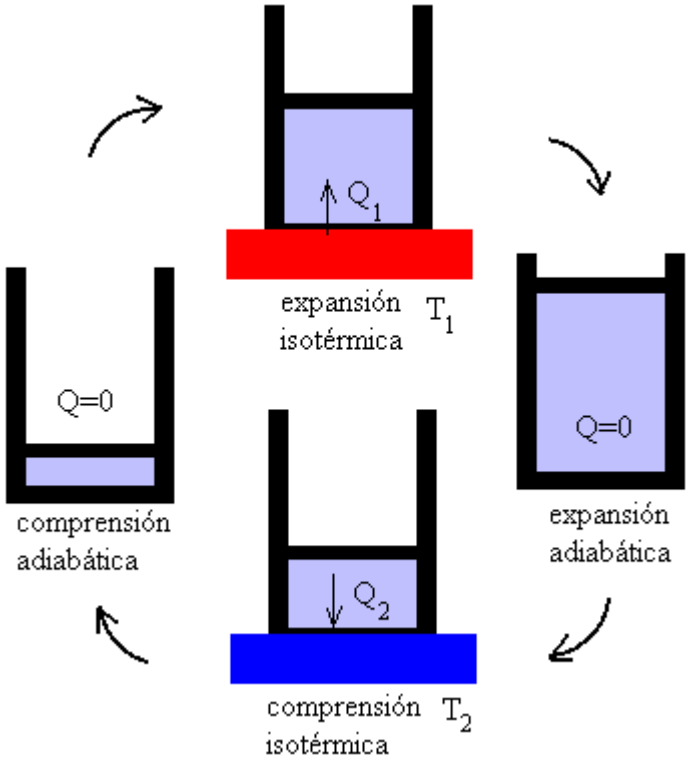


Ninguna máquina térmica que funcione entre dos depósitos de energía puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que funcione entre los mismos dos depósitos.



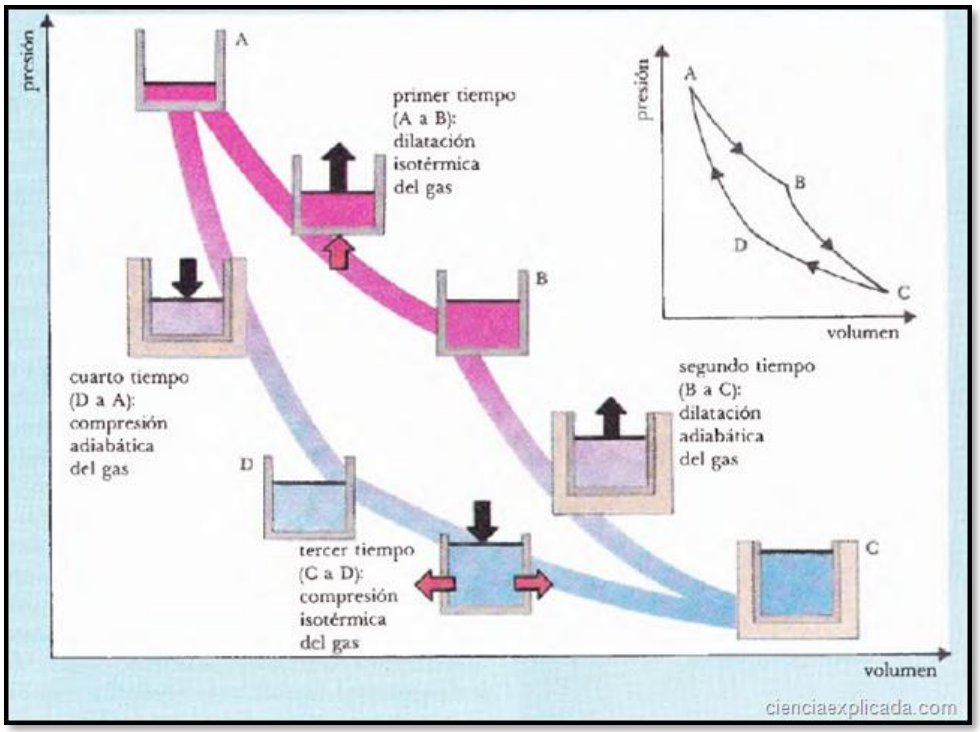


El Ciclo de Carnot



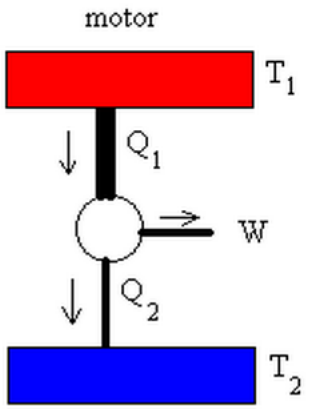
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



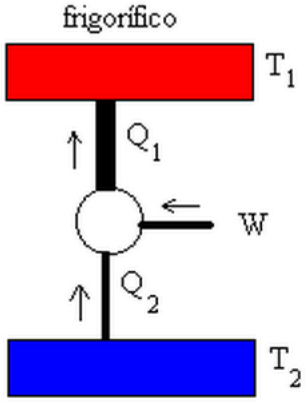
Etapas del Ciclo de Carnot

Motor y frigorífico



Un motor de Carnot es un dispositivo ideal que describe un ciclo de Carnot. Trabaja entre dos focos, tomando calor Q_1 del foco caliente a la temperatura T_1, produciendo un trabajo W, y cediendo un calor Q_2 al foco frío a l temperatura T_2.

En un motor real, el foco caliente está representado por la caldera de vapor que suministra el calor, el sistema cilindro-émbolo produce el trabajo y se cede calor al foco frío que es la atmósfera.



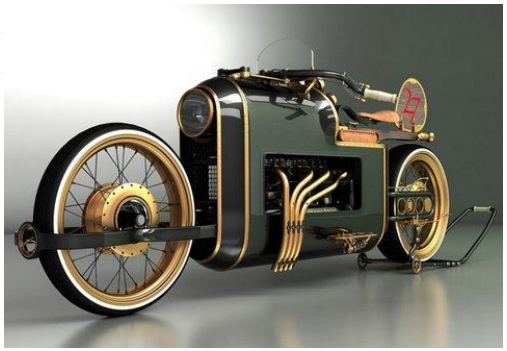
La máquina de Carnot también puede funcionar en sentido inverso, denominándose entonces frigorífico. Se extraería calor Q_2 del foco frío aplicando un trabajo W, y cedería Q_1 al foco caliente.

En un frigorífico real, el motor conectado a la red eléctrica produce un trabajo que se emplea en extraer un calor del foco frío (la cavidad del frigorífico) y se cede calor al foco caliente, que es la atmósfera.

EJEMPLO **La máquina de vapor**

Una máquina de vapor tiene un calentador que funciona a 500 K. La energía del combustible quemado cambia el agua líquida a vapor, y este vapor después impulsa un pistón. La temperatura del depósito frío es la del aire exterior, aproximadamente 300 K. ¿Cuál es la máxima eficiencia térmica de esta máquina de vapor?

BICICLETA RUSA STEAMPUNK



SOLUCIÓN

Sustituya las temperaturas de los depósitos: $e_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{300\ \text{K}}{500\ \text{K}} = 0.400$ o 40.0%

Este resultado es la máxima eficiencia *teórica* de la máquina. En la práctica, la eficiencia es considerablemente menor.

¿Qué pasaría si? Suponga que se quiere aumentar la eficiencia teórica de esta máquina. Este aumento se puede lograr al elevar T_h en ΔT o reducir T_c por la misma ΔT. ¿Qué sería más efectivo?

Respuesta Una ΔT determinada tendría un mayor efecto fraccionario en una temperatura menor, así que se esperaría un mayor cambio en eficiencia si se altera T_c en ΔT. Pruebe esto numéricamente. Elevar T_h en 50 K, lo que corresponde a $T_h = 550$ K, daría una máxima eficiencia de

$$e_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{300\ \text{K}}{550\ \text{K}} = 0.455$$

Reducir T_c en 50 K, lo que corresponde a $T_c = 250$ K, daría una eficiencia máxima de

$$e_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{250\ \text{K}}{500\ \text{K}} = 0.500$$

Aunque cambiar T_c es *matemáticamente* más efectivo, con frecuencia cambiar T_h es *prácticamente* más factible.

LA ENTROPÍA

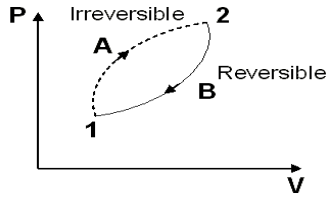
La entropía describe lo irreversible de los sistemas termodinámicos.
La palabra *entropía* procede del griego y significa evolución o transformación.

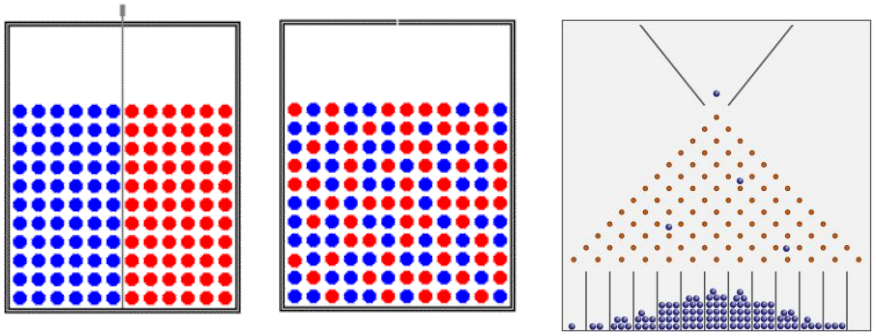
Entropía (definición microscópica) ▶ $S = k \ln \Omega$

Mientras más microestados haya que correspondan a un macroestado determinado, mayor será la entropía de dicho macroestado.

$$S_{\text{gen}} \begin{cases} > 0 & \text{proceso irreversible} \\ = 0 & \text{proceso reversible} \\ < 0 & \text{proceso imposible} \end{cases}$$

La cantidad de entropía de un sistema es proporcional al logaritmo natural del número de microestados posibles.





Distribución de Microestados

Resumen

DEFINICIONES

La **eficiencia térmica** e de una máquina térmica es

$$e \equiv \frac{W_{\text{máq}}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}$$

Desde un punto de vista microscópico, la entropía de un cierto macroestado se define como

$$S \equiv k_B \ln W$$

donde k_B es la constante de Boltzmann y W es el número de microestados del sistema que corresponden al macroestado.

En un proceso **reversible**, el sistema puede regresar a su condición inicial a lo largo de la misma trayectoria sobre un diagrama PV y cada punto a lo largo de su trayectoria es un estado de equilibrio. Un proceso que no satisface este requisito es **irreversible**.

Una **máquina térmica** es un dispositivo que toma energía por calor y, al funcionar en un proceso cíclico, expulsa una fracción de dicha energía mediante trabajo. El trabajo neto realizado por una máquina térmica al llevar una sustancia de trabajo a través de un proceso cíclico ($\Delta E_{\text{int}} = 0$) es

$$W_{\text{máq}} = |Q_h| - |Q_c|$$

donde $|Q_h|$ es la energía que se toma de un depósito caliente y $|Q_c|$ es la energía que se expulsa a un depósito frío.

La **segunda ley de la termodinámica** establece lo siguiente:

- Es imposible construir una máquina térmica que, al funcionar en un ciclo, no produzca otro efecto que la entrada de energía por calor desde un depósito y la realización de una cantidad igual de trabajo (enunciado de Kelvin–Planck).
- Es imposible construir una máquina cíclica cuyo único efecto sea la transferencia continua de energía, mediante calor, de un objeto a otro a una mayor temperatura sin la entrada de energía por trabajo (enunciado de Clausius).

El **teorema de Carnot** establece que ninguna máquina térmica real que funcione (irreversiblemente) entre las temperaturas T_c y T_h puede ser más eficiente que una máquina que funcione reversiblemente en un ciclo de Carnot entre las mismas dos temperaturas.

La eficiencia térmica de una máquina térmica que funciona en el ciclo de Carnot es

$$e_C = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

La segunda ley de la termodinámica afirma que, cuando se presentan procesos reales (irreversibles), el grado de desorden en el sistema y los alrededores, aumenta. Cuando se presenta un proceso en un sistema aislado, el estado del sistema se vuelve más desordenado. La medida de desorden en un sistema se llama **entropía** S. Debido a eso, incluso otra forma de la segunda ley se puede establecer del modo siguiente:

- La entropía del Universo aumenta en todos los procesos reales.

Contenidos

DECLARATIVOS

I. LEYES DE LA TERMODINÁMICA.

1. Introducción: conceptos básicos; propiedades termodinámicas básicas.

2. Transferencia de energía calorífica: conducción; resistencia térmica; convección; radiación.

3. Primera ley de la termodinámica: energía térmica; energía interna; trabajo efectuado por un sistema; enunciado de la primera ley; proceso isobárico; proceso isocórico; proceso isotérmico; proceso adiabático; eficiencia en una máquina térmica.

4. Entropía y segunda ley de la termodinámica: enunciado de la segunda ley; concepto de entropía; definición conceptual del ciclo de *Carnot*.

Es importante mencionar que los temas se cubrirán de manera completa más no exhaustiva.

Curso de Física Avanzada

Temperatura

Primera ley de la termodinámica

Teoría cinética de los gases

Máquinas térmicas, entropía y segunda ley de la termodinámica

Temperatura

Temperatura y ley cero de la termodinámica
Termómetros y escala de temperatura Celsius
Termómetro de gas a volumen constante y escala absoluta de temperatura
Expansión térmica de sólidos y líquidos
Descripción macroscópica de un gas ideal

Curso de Física Avanzada

Temperatura

Primera ley de la termodinámica

Teoría cinética de los gases

Máquinas térmicas, entropía y segunda ley de la termodinámica

Primera ley de la termodinámica

Calor y energía interna

Calor específico y calorimetría

Calor latente

Trabajo y calor en procesos termodinámicos

Primera ley de la termodinámica

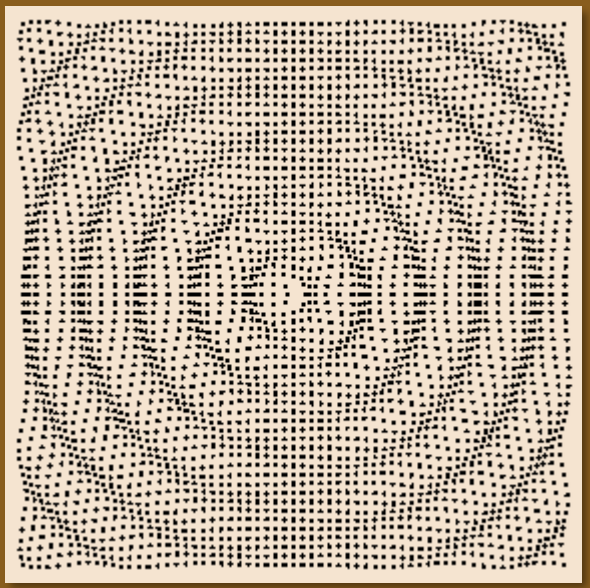
Algunas aplicaciones de la primera ley de la termodinámica

Mecanismos de transferencia de energía

FIN

FÍSICA BÁSICA

EL SONIDO



POLIGONO EDICIONES

CLASE DE FÍSICA ILUSTRADA

Contenidos

DECLARATIVOS

II. El SONIDO.

1. Terminología: concepto de onda; periodo y frecuencia de oscilación; amplitud; fase; longitud de onda.
2. Ondas sonoras: ondas estacionarias; velocidad del sonido en distintos medios; intensidad de una onda sonora; nivel de sonido y potencia acústica (decibeles).
3. Ondas complejas: armónicas; octavas; concepto de 'espectro'.
4. El oído y la percepción del sonido: sensibilidad del oído; fundamentos de la anatomía del oído; intensidad contra frecuencia; área de auditividad; ancho de banda; relación del timbre con el espectro. (tema para investigación).
5. Fenómenos acústicos: absorción; reflexión; difracción; refracción; difusión; efecto Doppler; interferencia; resonancia (oscilación "en fase" y "fuera de fase").

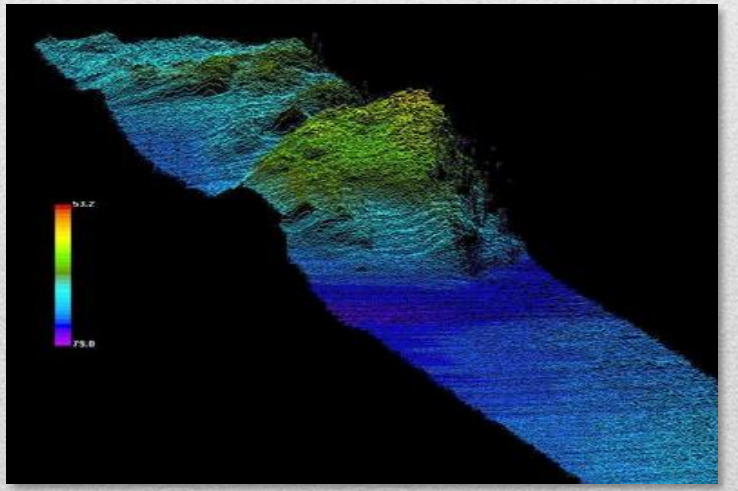
Es importante mencionar que los temas se cubrirán de manera completa más no exhaustiva.

Curso de Física Avanzada

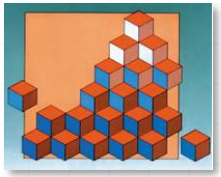
OSCILACIONES Y ONDAS MECÁNICAS

- Movimiento oscilatorio
- Movimiento ondulatorio
- Ondas sonoras
- Sobreposición y ondas estacionarias

- Propagación de una perturbación
- El modelo de onda progresiva
- La rapidez de ondas en cuerdas
- Reflexión y transmisión
- Rapidez de transferencia de energía mediante ondas sinusoidales en cuerdas
- La ecuación de onda lineal



Objetivos de la Lección



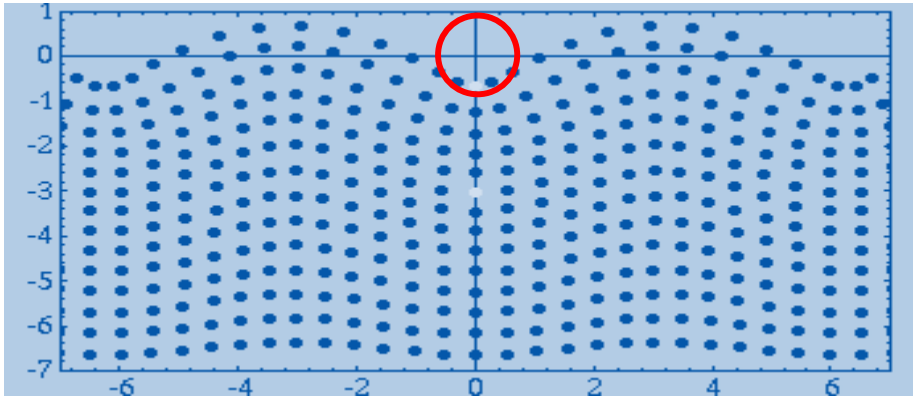
Al terminar esta lección el alumno será capaz de:

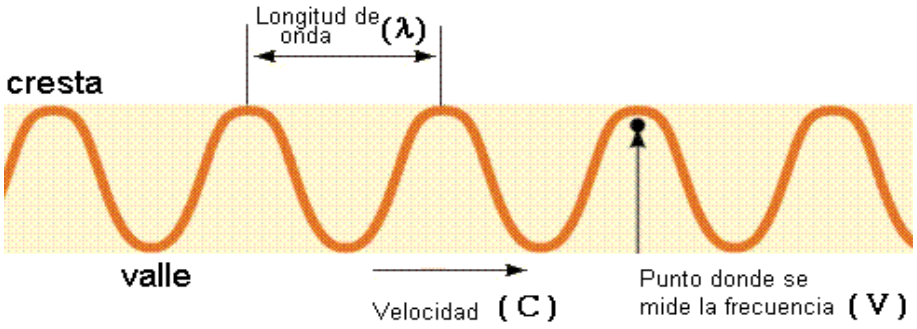
- *Explicar el concepto de propagación de una perturbación.*
- *Distinguir el modelo de onda progresiva.*
- *Identificar las características de la reflexión y trasmisión de ondas.*
- *Reconocer la ecuación de onda lineal.*

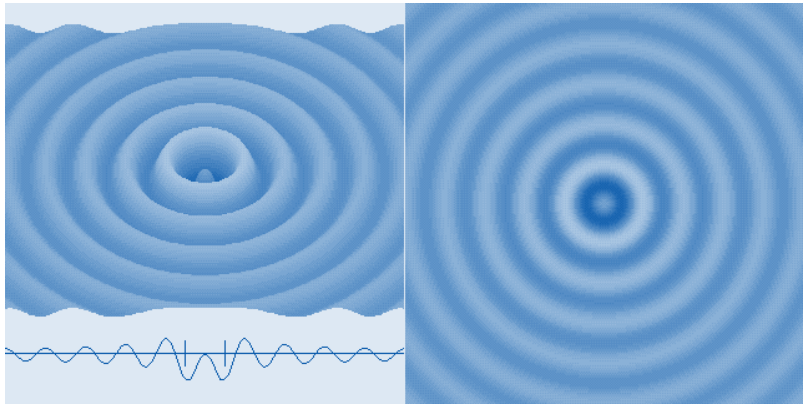
Movimiento ondulatorio

Una onda transporta energía pero no transporta materia.

Las partículas vibran alrededor de la posición de equilibrio pero no viajan con la perturbación.

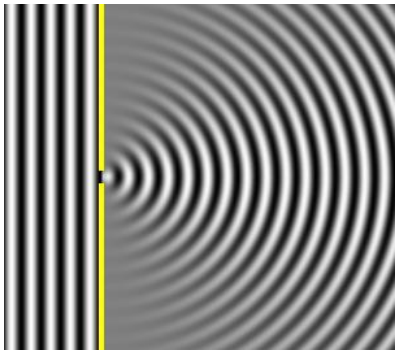






Movimiento ondulatorio

Las ondas pueden ser unidimensionales bidimensionales y tridimensionales según se propaguen en una sola dirección, en un plano o en las tres dimensiones del espacio.

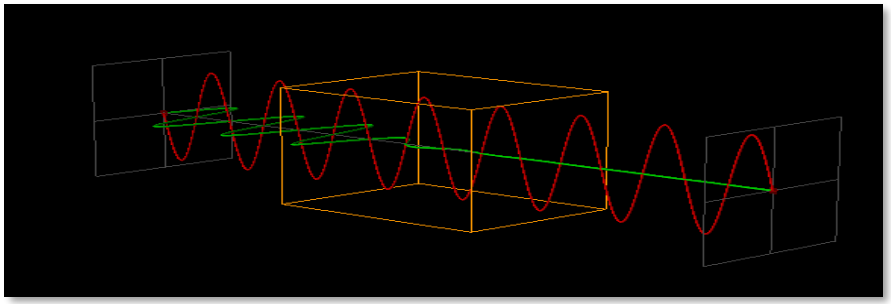


- **Unidimensional:** Onda transversal en una cuerda.
- **Bidimensional:** Olas concéntricas en la superficie de un estanque.
- **Tridimensional:** El sonido en el aire.

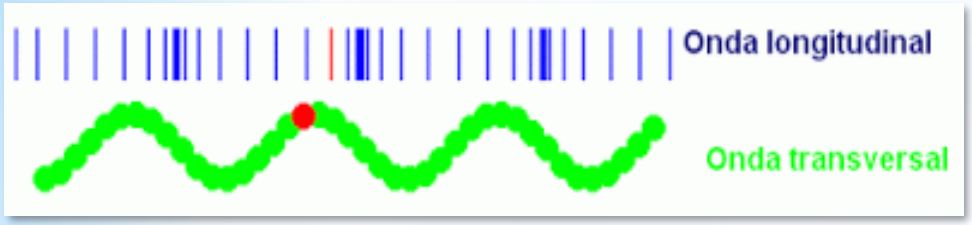
Además las ondas se dividen en materiales o mecánicas y electromagnéticas, la diferencia principal es que las ondas mecánicas necesitan un medio material para propagarse mientras las ondas electromagnéticas, como la luz, viajan por el espacio-tiempo.

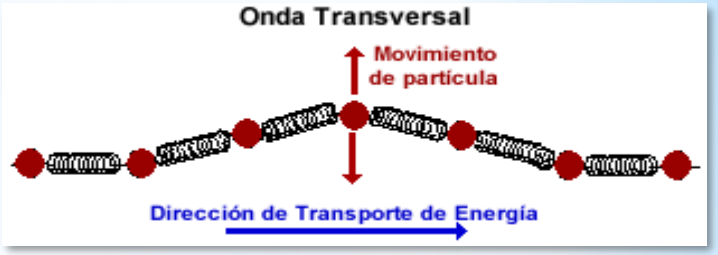
"Olas"
Onda plana en el mar

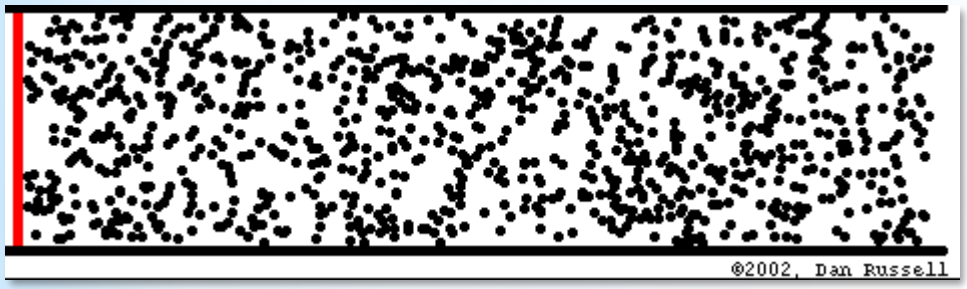
Representación de una onda electro-magnética.

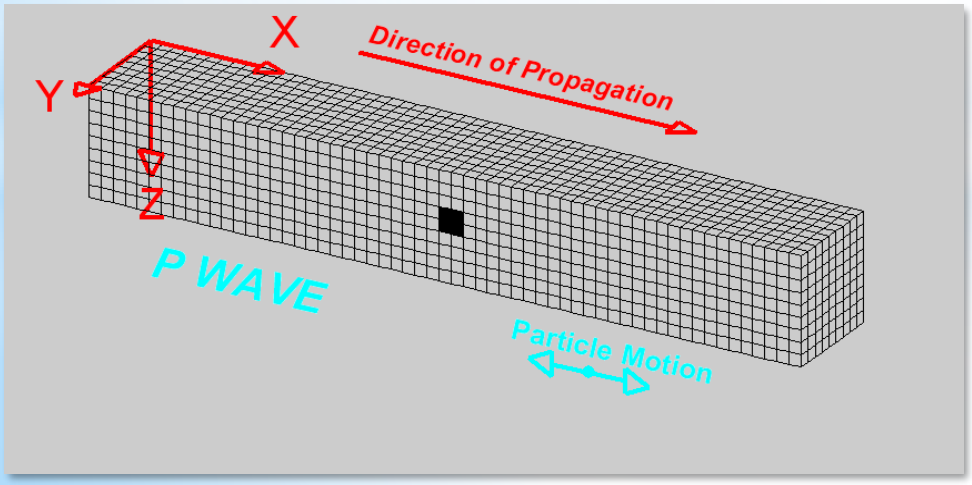


Tipos de Ondas



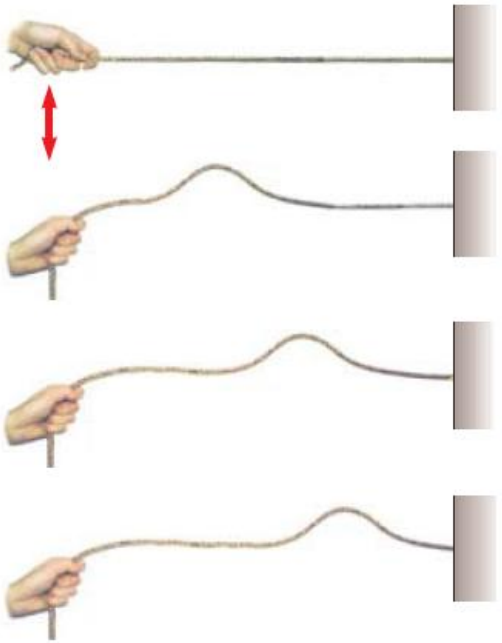




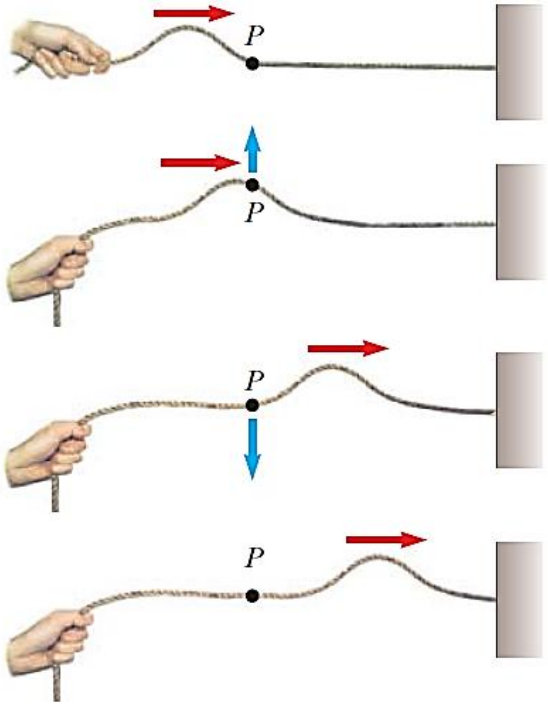


Propagación de una perturbación

Todas las ondas mecánicas requieren 1) alguna fuente de perturbación, 2) un medio que contenga elementos que sean factibles de perturbación y 3) algún mecanismo físico a partir del cual los elementos del medio puedan influirse mutuamente.



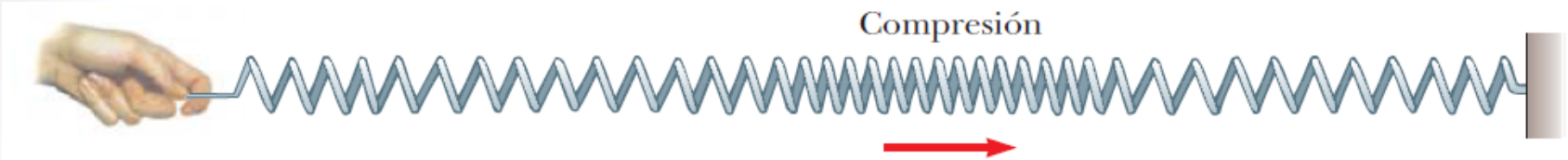
Un pulso viaja por una cuerda estirada. La forma del pulso es aproximadamente invariable mientras viaja a lo largo de la cuerda.



Un pulso transversal viaja sobre una cuerda estirada. La dirección de movimiento de cualquier elemento *P* de la cuerda (flechas azules) es perpendicular a la dirección de propagación (flechas rojas).

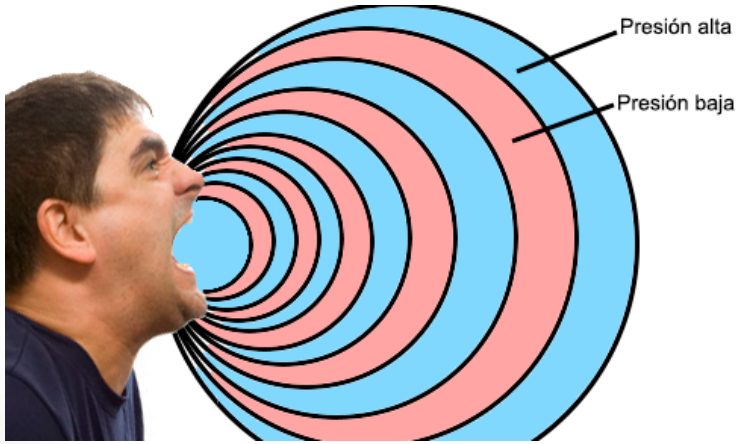
En realidad, el pulso cambia de forma y gradualmente se dispersa durante el movimiento. Este efecto, llamado *dispersión*, es común a muchas ondas mecánicas, así como a ondas electromagnéticas.

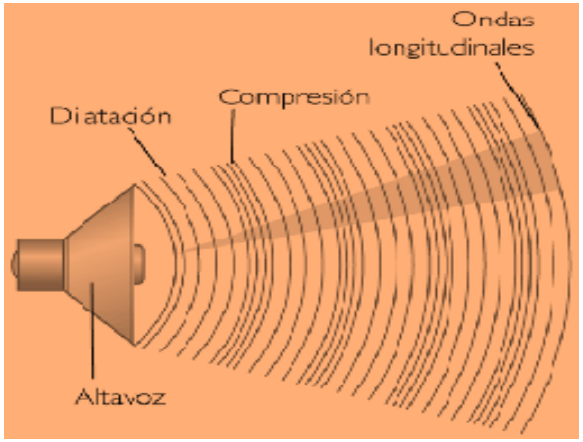
Propagación de una perturbación



Un pulso longitudinal a lo largo de un resorte estirado. El desplazamiento de las espiras es paralelo a la dirección de la propagación.

Las ondas sonoras, que se explicaran más adelante, son otro ejemplo de ondas longitudinales.
La perturbación en una onda sonora es una serie de regiones de alta y baja presiones que viajan en el aire.



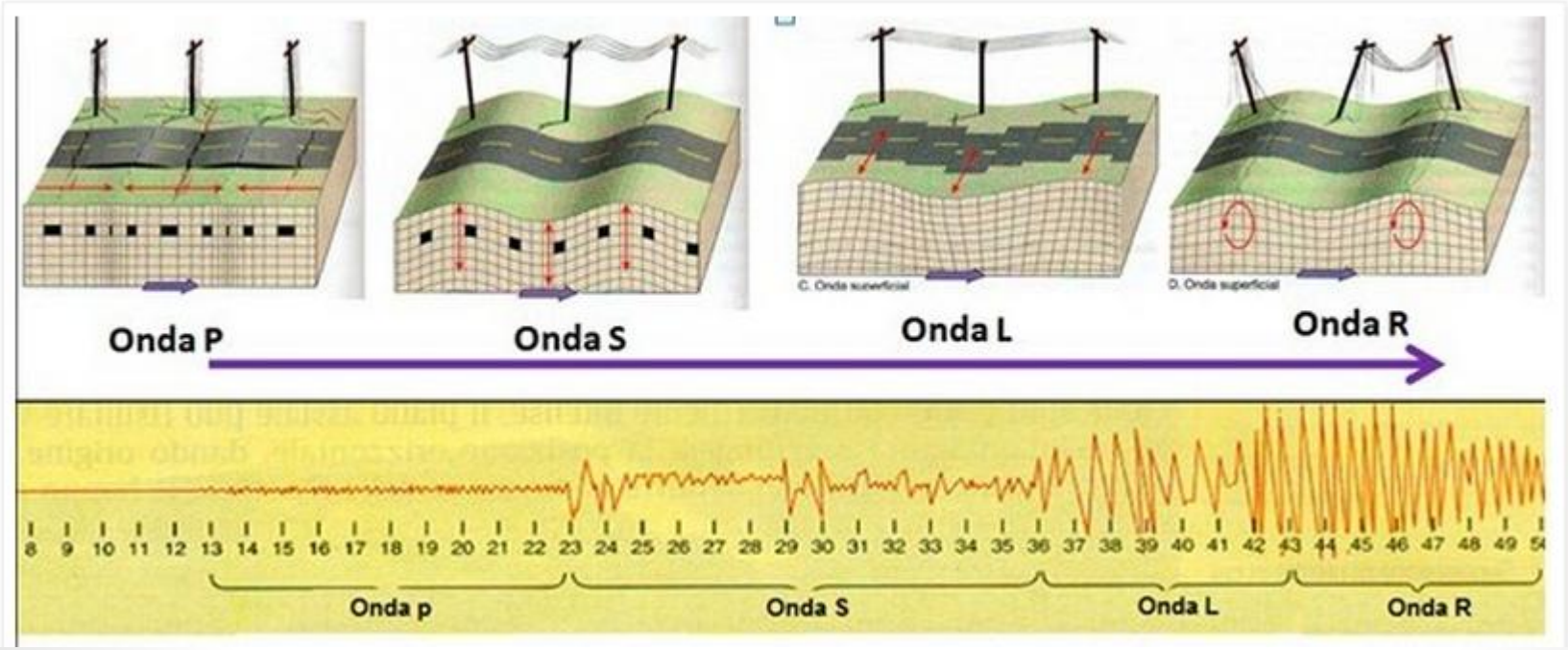


¿Como actúan las ondas sísmicas en un Terremoto?

Las ondas tridimensionales que viajan desde un punto abajo de la superficie de la Tierra donde se presenta un terremoto, son de ambos tipos, transversales y longitudinales. Las ondas longitudinales son las mas rápidas de las dos y viajan con magnitudes de velocidad en el intervalo de 7 a 8 km/s cerca de la superficie.

Se llaman **ondas P**, donde "P" es por *primarias*, porque viajan mas rápido que las ondas transversales y llegan primero a un sismógrafo (el dispositivo que se usa para detectar ondas debidas a terremotos).

Las ondas transversales mas lentas, llamadas **ondas S**, donde "S" es para *secundarias*, viajan a través de la Tierra a 4 o 5 km/s cerca de la superficie.



¿Como actúan las ondas sísmicas en un Terremoto?

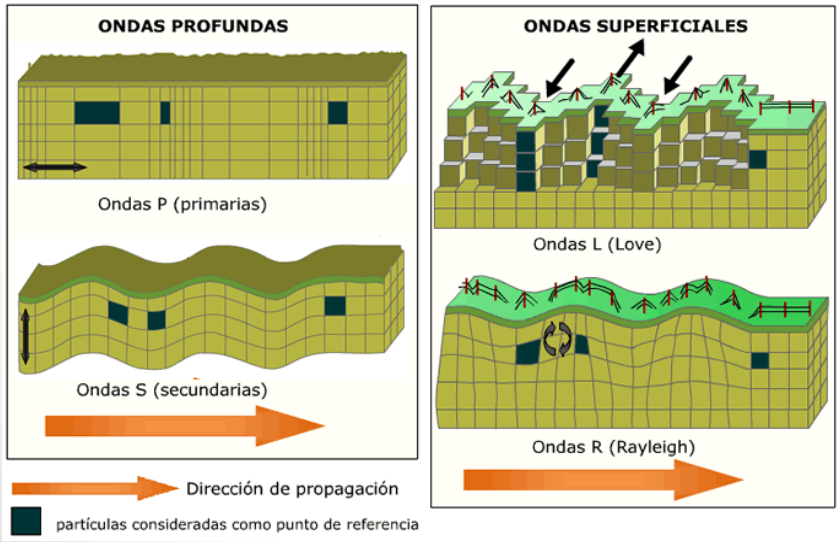
Las ondas Love, conocidas como L, estas son mucho más fuetes y son destructoras, tiene una características de ser perpendiculares la ondas P y se perciben como una fuerza nos da la sensación de que se abren los pies, esta ondas es la responsable de las aperturas de tierra o creadoras de zanjas.

Estas son malas, causan daños, son las terceras en llegar.

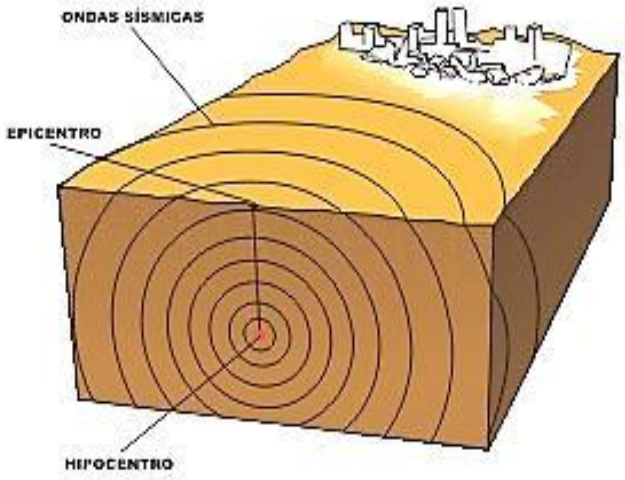
Las ondas Rayleigh, conocida como R, que son las más destructoras y más lentas, y se perciben como ondas de carácter circular en la vertical, tienden expulsar los objetos y personas hacia delante, con la tendencia de rodar en la superficie, como ola de mar.

Estas son las destructoras, las que matan.

El máximo daño se produce, cuando todas los tipos de ondas se juntan y se potencian entrando en resonancia

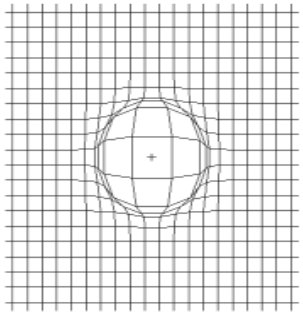


¿Como actúan las ondas sísmicas en un Terremoto?

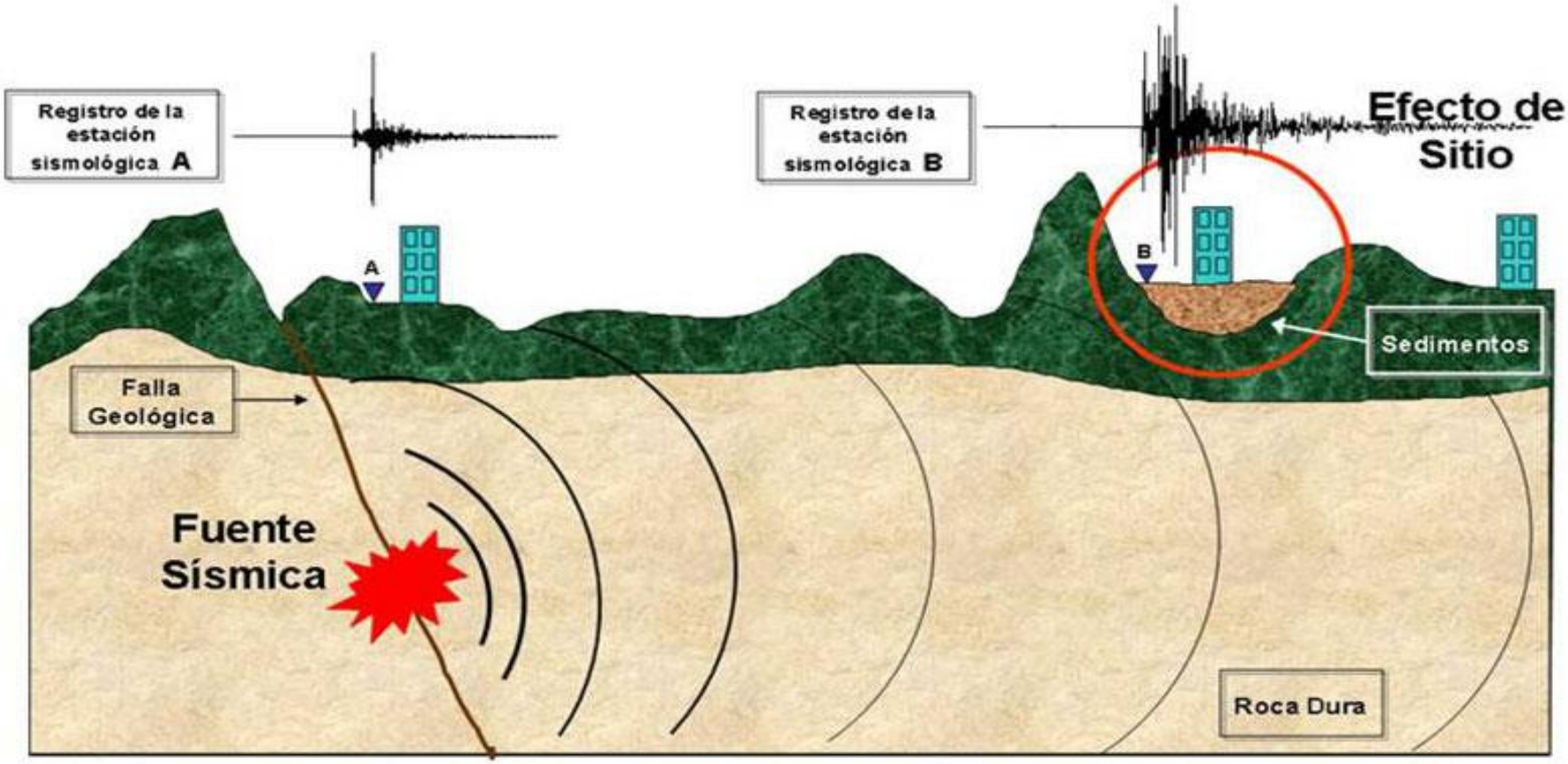


Al registrar en un sismógrafo el intervalo de tiempo entre las llegadas los tipos de ondas P y S, se determina la distancia desde el sismógrafo al punto de origen de las ondas.

Una sola medición establece una esfera imaginaria con centro en el sismógrafo, donde el radio de la esfera se determina mediante la diferencia en los tiempos de llegada de las ondas P y S.



EL MOVIMIENTO DEL SUELO DEPENDE DE :
Fuente + Trayectoria + Sitio



El origen de las ondas se ubica en alguna parte sobre las esferas de medición.

Las esferas imaginarias desde tres o mas estaciones de monitoreo, ubicadas muy separadas unas de otras, se intersecan en una región de la Tierra, y esta región es donde se presento el terremoto.

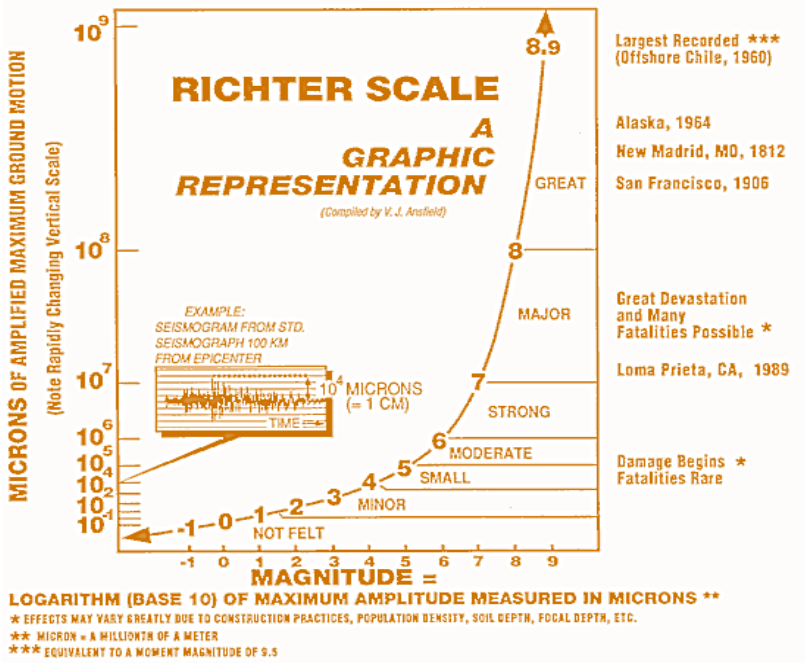
Escalas Sísmicas

ESCALA RICHTER

La escala Richter fue desarrollada por el americano Charles F. Ritcher en los años 30.

Charles F. Richter (1900-1985)

Magnitud	Efectos probables
1	Detectable sólo por los instrumentos
2-3	Ligeramente por las personas
4-5	Detectable a 32 km del epicentro. Posibles daños ligeros en un área pequeña.
6	Bastante destructivo
7	Terremoto importante
8	Terremoto muy destructivo



Representa la energía sísmica liberada en cada terremoto y se basa en el registro sismográfico. Es una escala que crece en forma potencial o semilogarítmica, de manera que cada punto de aumento puede significar un aumento diez o más veces mayor de la magnitud de las ondas (vibración de la tierra), pero la energía liberada aumenta 32 veces. Una magnitud 4 no es el doble de 2, sino que 100 veces mayor.

(El Doctor en física de la Universidad de Barcelona, Sr. Josep Vila, nos aporta que entre magnitud 2 y magnitud 4, lo que aumenta 100 veces sería la amplitud de las ondas y no la energía. La energía aumentaría un factor 33 cada grado de magnitud, con lo cual sería 1000 veces cada dos unidades).

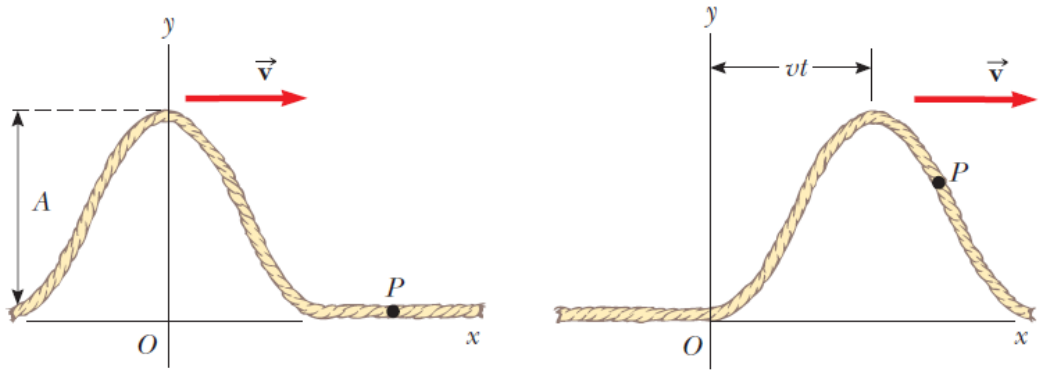
El gran mérito del Dr. Charles F. Richter (del California Institute for Technology, 1935) consiste en asociar la magnitud del Terremoto con la "amplitud" de la onda sísmica, lo que redunda en propagación del movimiento en un área determinada. El análisis de esta onda (llamada "S") en un tiempo de 20 segundos en un registro sismográfico, sirvió como referencia de "calibración" de la escala. Teóricamente en esta escala pueden darse sismos de magnitud negativa, lo que corresponderá a leves movimientos de baja liberación de energía.

Escalas Sísmicas

Escala De Mercalli

Grado	Descripción
I. Muy débil	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II. Débil	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III. Leve	Se percibe en los interiores de los edificios y casas.
IV. Moderado	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
V. fuerte	La mayoría de las personas lo percibe aun en el exterior. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y pueden llegar a derramarse. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento sísmico.
VI. Bastante Fuerte	Lo perciben todas las personas. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se hace visible el movimiento de los árboles, o bien, se les oye crujir.
VII. Muy fuerte	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. Se producen daños de consideración en estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Se dañan los muebles. Caen trozos de mampostería, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Se producen ondas en los lagos.
VIII. Destructivo	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aun el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos.
IX. Ruinoso	Pánico generalizado. Todos los edificios sufren grandes daños. Las casas sin cimentación se desplazan. Se quiebran algunas canalizaciones subterráneas, la tierra se fisura.
X. Desastroso	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. El agua de canales, ríos y lagos sale proyectada a las riberas.
XI. Muy desastroso	Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las cañerías subterráneas quedan totalmente fuera de servicio.
XII. Catastrófico	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionados.

Pulsos de Ondas



a) Pulso en $t = 0$ b) Pulso en el tiempo t

Un pulso unidimensional que viaja hacia la derecha con una rapidez v. a) En $t = 0$, la forma del pulso se conoce por $y = f(x)$. b) En algún tiempo posterior t, la forma permanece invariable y la posición vertical de un elemento del medio en cualquier punto P se conoce por $y = f(x - vt)$.

En general, después, se representa la posición transversal y para todas las posiciones y tiempos, medida en un marco estable con el origen en O, como

Pulso que viaja hacia la derecha ▶ $$y(x, t) = f(x - vt)$$

De igual modo, si el pulso viaja hacia la izquierda, las posiciones transversales de los elementos de la cuerda se describen mediante

Pulso que viaja hacia la izquierda ▶ $$y(x, t) = f(x + vt)$$

La función y, a veces llamada **función de onda**, depende de las dos variables x y t.

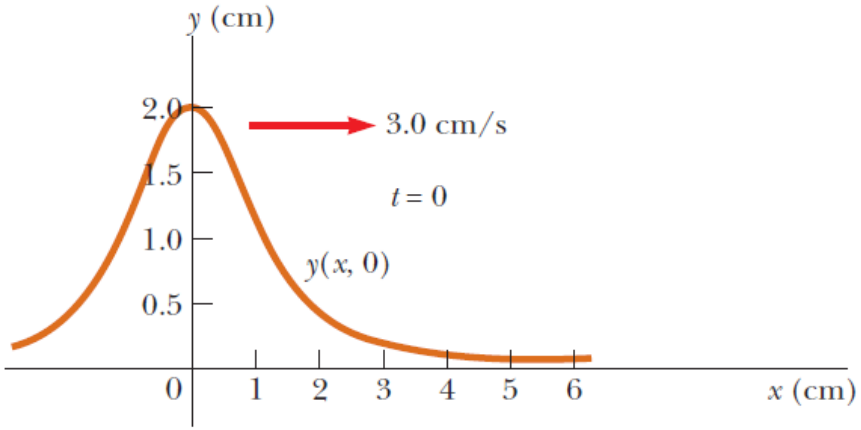
Pregunta rápida **i)** En una larga fila de personas que esperan comprar boletos, la primera persona sale y un pulso de movimiento se presenta a medida que las personas caminan hacia adelante para llenar el hueco. A medida que cada persona camina hacia adelante, el hueco se mueve a través de la fila. La propagación de este hueco es, ¿a) transversal, o b) longitudinal? **ii)** Considere la "ola" en un juego de beisbol: las personas se ponen de pie y levantan sus brazos a medida que la ola llega a sus posiciones, y el pulso resultante se mueve alrededor del estadio. Esta onda es, ¿a) transversal, o b) longitudinal?

EJEMPLO **Un pulso que se mueve hacia la derecha**

Un pulso que se mueve hacia la derecha a lo largo del eje x se representa mediante la función de onda

$$y(x, t) = \frac{2}{(x - 3.0t)^2 + 1}$$

donde x y y se miden en centímetros y t en segundos. Encuentre expresiones para la función de onda en $t = 0$, $t = 1.0$ s y $t = 2.0$ s.



SOLUCIÓN

Escriba la expresión para la función de onda en $t = 0$: $$y(x, 0) = \frac{2}{x^2 + 1}$$

Escriba la expresión para la función de onda en $t = 1.0$ s: $$y(x, 1.0) = \frac{2}{(x - 3.0)^2 + 1}$$

Escriba la expresión para la función de onda en $t = 2.0$ s: $$y(x, 2.0) = \frac{2}{(x - 6.0)^2 + 1}$$

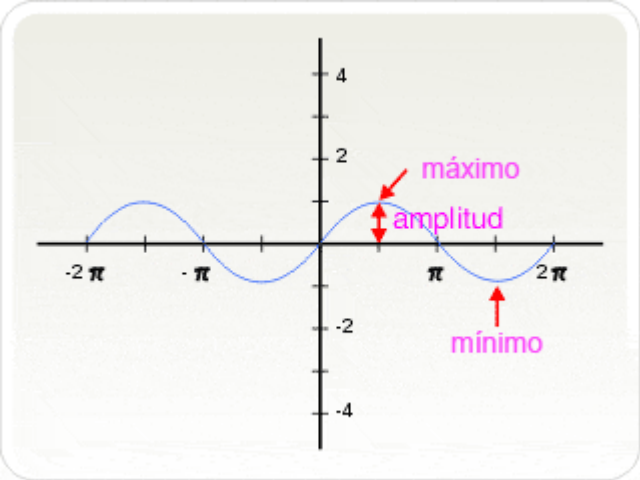
¿Qué pasaría si? ¿Si la función de onda fuese

$$y(x, t) = \frac{4}{(x + 3.0t)^2 + 1}?$$

¿Esto cómo cambiaría la situación?

Respuesta Una nueva característica en esta expresión es el signo mas en el denominador en lugar del signo menos. La nueva expresión representa un pulso con la misma forma que en la figura anterior, pero que se mueve hacia la izquierda a medida que avanza el tiempo.

Otra nueva característica en este caso es el numerador 4 en vez de 2. Por lo tanto, la nueva expresión representa un pulso con el doble de alto que en la figura.



El modelo de onda progresiva

onda sinusoidal

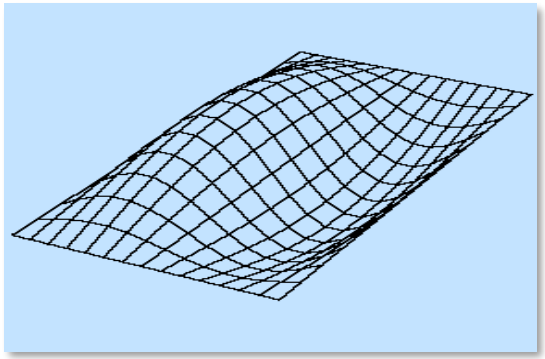
La curva café en la figura 16.7 representa una instantánea de una onda sinusoidal progresiva en $t = 0$, y la curva azul representa una instantánea de la onda en algún tiempo posterior t.

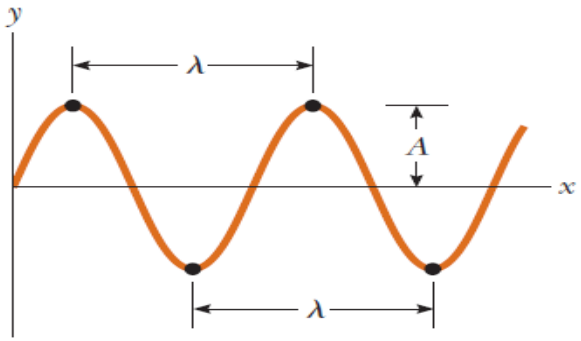
La frecuencia de una onda sinusoidal se relaciona con el periodo

$$f = \frac{1}{T}$$

La unidad de frecuencia es s^{-1}, o **hertz** (Hz).

La máxima posición de un elemento del medio relativo a su posición de equilibrio se llama **amplitud** A de la onda.





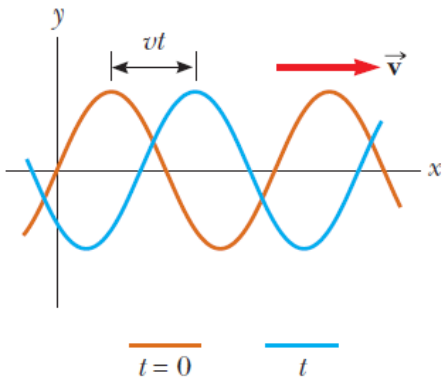
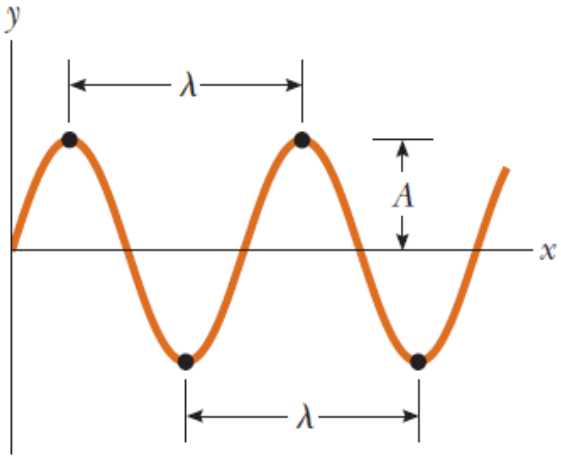


Figura 16.7 Una onda sinusoidal unidimensional que viaja hacia la derecha con una rapidez v. La curva café representa una instantánea de la onda en $t = 0$ y la curva azul representa una instantánea en algún tiempo después t.

$$y(x, 0) = A \operatorname{sen} ax$$

El modelo de onda progresiva



En $x = 0$, se ve que $y(0, 0) = A \text{ sen } a(0) = 0$, consistente con la figura.

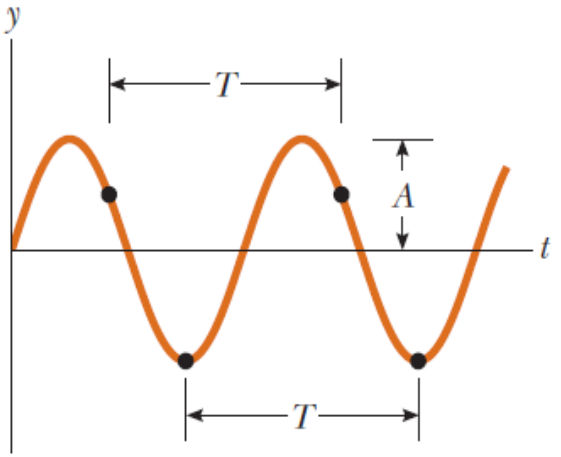
El siguiente valor de x para el que y es cero es $x = \lambda/2$. Debido a eso

$$y\left(\frac{\lambda}{2}, 0\right) = A \text{ sen } \left(a\frac{\lambda}{2}\right) = 0$$

Para que esta ecuación sea cierta, debe tener $a\lambda/2 = \pi$ o $a = 2\pi/\lambda$. En consecuencia, la función que describe las posiciones de los elementos del medio a través del que viaja la onda sinusoidal se puede escribir

$$y(x, 0) = A \text{ sen } \left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

donde la constante A representa la amplitud de onda y la constante λ es la longitud de onda.

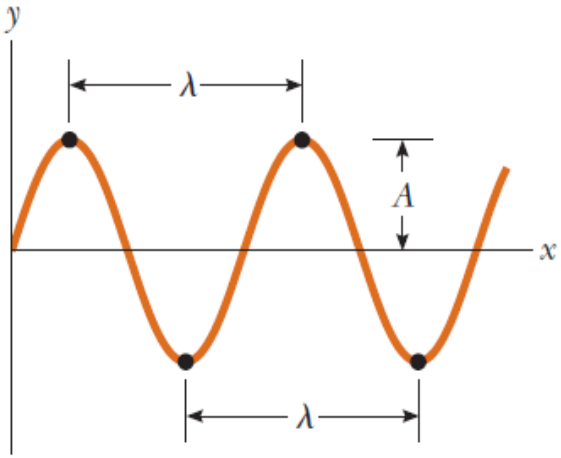


Note que la posición vertical de un elemento del medio es la misma siempre que x aumente por un múltiplo entero de λ. Si la onda se mueve hacia la derecha con una rapidez v, la función de onda en algún tiempo posterior t es

$$y(x, t) = A \text{ sen } \left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]$$

La función de onda tiene la forma $f(x - vt)$ (ecuación 16.1). Si la onda viajara hacia la izquierda, la cantidad $x - vt$ se sustituiría por $x + vt$.

El modelo de onda progresiva

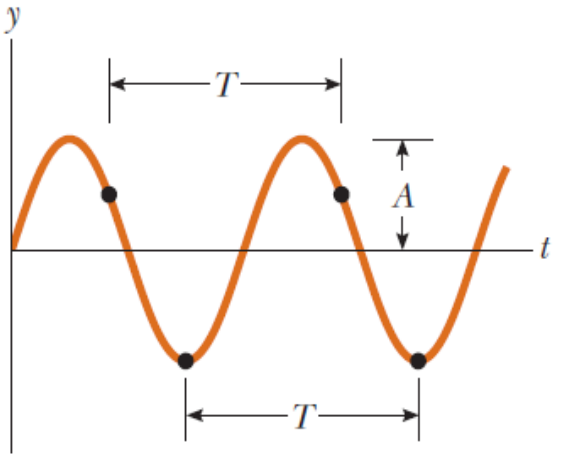


Por definición, la onda viaja a través de un desplazamiento Δx igual a una longitud de onda λ en un intervalo de tiempo Δt de un periodo T. Por tanto, la rapidez de onda, la longitud de onda y el periodo se relacionan mediante la expresión

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T}$$

Al sustituir esta expresión para v se obtiene

$$y = A \operatorname{sen}\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$



Esta forma de la función de onda muestra la naturaleza *periódica* de y.

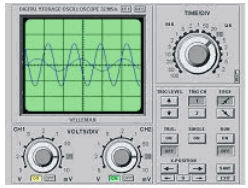
En cualquier tiempo dado t, y tiene el *mismo* valor en las posiciones x, $x + \lambda$, $x + 2\lambda$, y así sucesivamente. Además, en cualquier posición determinada x, el valor de y es el mismo en los tiempos t, $t + T$, $t + 2T$, y así sucesivamente.

El modelo de onda progresiva

La función de onda se expresa en una forma conveniente al definir otras dos cantidades, el **número de onda angular** k (por lo general simplemente llamado **número de onda**) y la **frecuencia angular** ω:

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$$

◀ Número de onda angular

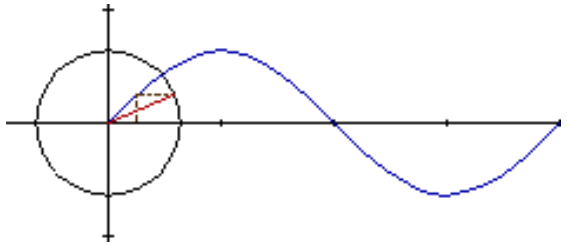


Frecuencia angular ▶

$$\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Función de onda para una onda sinusoidal ▶

$$y = A \operatorname{sen}\,(kx - \omega t)$$



$$v = \frac{\omega}{k}$$

Rapidez de una onda sinusoidal ▶

$$v = \lambda f$$

la función de onda por lo general se expresa en la forma

Expresión general para una onda sinusoidal ▶ $y = A \operatorname{sen}\,(kx - \omega t + \phi)$

donde ϕ es la **constante de fase**, Esta constante se determina a partir de las condiciones iniciales.

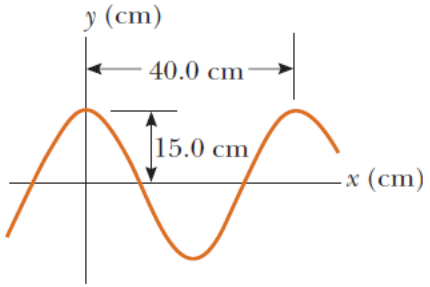
Pregunta rápida Una onda sinusoidal de frecuencia f viaja a lo largo de una cuerda estirada. La cuerda se lleva al reposo y una segunda onda progresiva con frecuencia $2f$ se establece en la cuerda. **i)** ¿Cuál es la rapidez de onda de la segunda onda? a) el doble de la primera onda, b) la mitad de la primera onda, c) la misma que la primera onda, d) imposible de determinar. **ii)** A partir de las mismas opciones, describa la longitud de onda de la segunda onda. **iii)** A partir de las mismas opciones, describa la amplitud de la segunda onda.

EJEMPLO **Una onda sinusoidal progresiva**

Una onda sinusoidal progresiva en la dirección x positiva tiene una amplitud de 15.0 cm, longitud de onda de 40.0 cm y frecuencia de 8.00 Hz. La posición vertical de un elemento del medio en $t = 0$ y $x = 0$ también es de 15.0 cm, como se muestra en la figura 16.9.

A) Encuentre el número de onda k, periodo T, frecuencia angular ω y rapidez v de la onda.

B) Determine la constante de fase ϕ y escriba una expresión general para la función de onda.



onda sinusoidal con longitud de onda $\lambda = 40.0$ cm y amplitud $A = 15.0$ cm. La función de onda se puede escribir en la forma $y = A \cos(kx - \omega t)$.

SOLUCIÓN

A)

Evalúe el número de onda: $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{40.0 \text{ cm}} = 0.157 \text{ rad/cm}$

Calcule el periodo de la onda: $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8.00 \text{ s}^{-1}} = 0.125 \text{ s}$

Evalúe la frecuencia angular de la onda: $\omega = 2\pi f = 2\pi(8.00 \text{ s}^{-1}) = 50.3 \text{ rad/s}$

Calcule la rapidez de onda: $v = \lambda f = (40.0 \text{ cm})(8.00 \text{ s}^{-1}) = 320 \text{ cm/s}$

SOLUCIÓN

B)

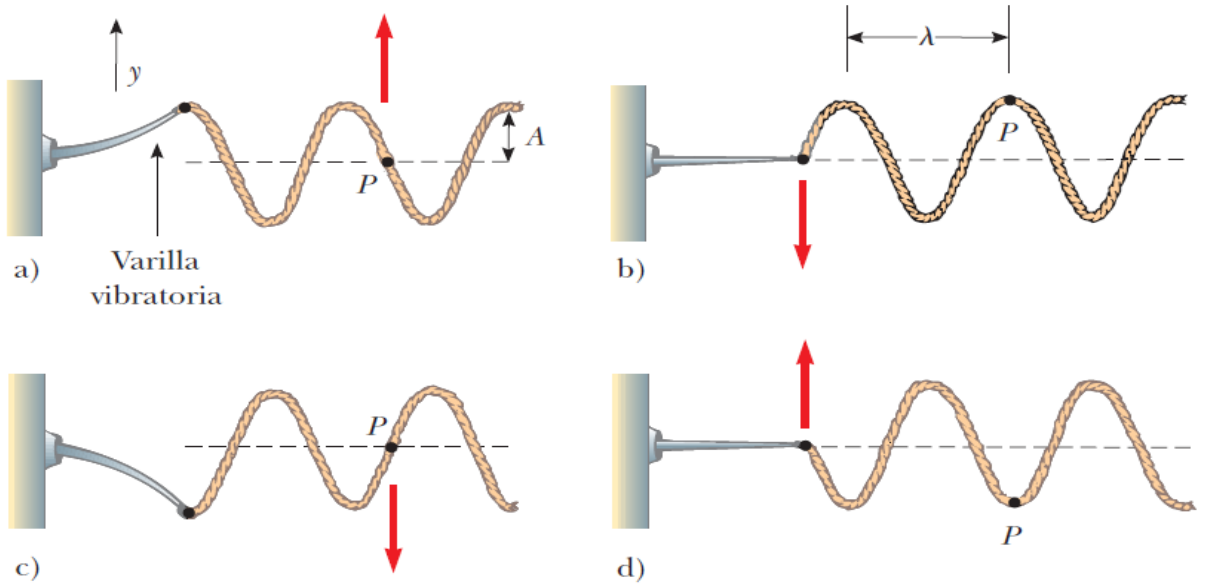
Sustituya $A = 15.0$ cm, $y = 15.0$ cm, $x = 0$ y $t = 0$: $15.0 = (15.0)\,\text{sen}\,\phi \rightarrow \text{sen}\,\phi = 1 \rightarrow \phi = \frac{\pi}{2}$ rad

Escriba la función de onda: $y = A\,\text{sen}\left(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) = A\cos(kx - \omega t)$

Sustituya los valores para A, k y ω en esta expresión: $y = (15.0 \text{ cm})\cos(0.157x - 50.3t)$

Ondas sinusoidales en cuerdas

$$y = A \operatorname{sen}\ (kx - \omega t)$$



Un método para producir una onda sinusoidal sobre una cuerda. El extremo izquierdo de la cuerda se conecta a una varilla que se pone a oscilar. Cualquier elemento de la cuerda, como el que se encuentra en el punto P, oscila con movimiento armónico simple en la dirección vertical.

Un elemento en el punto P (o cualquier otro elemento de la cuerda) se mueve sólo verticalmente, y de este modo su coordenada x permanece constante. Por lo tanto, la **rapidez transversal** v_y (no confundir con la rapidez de onda v) y la **aceleración transversal** a_y de los elementos de la cuerda son

$$v_y = \left.\frac{dy}{dt}\right]_{x=\text{constante}} = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega A \cos\ (kx - \omega t)$$

$$a_y = \left.\frac{dv_y}{dt}\right]_{x=\text{constante}} = \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\omega^2 A \operatorname{sen}\ (kx - \omega t)$$

Ondas sinusoidales en cuerdas

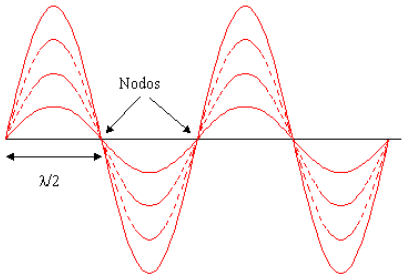
Los valores máximos de la rapidez transversal y la aceleración transversal son simplemente los valores absolutos de los coeficientes de las funciones coseno y seno:

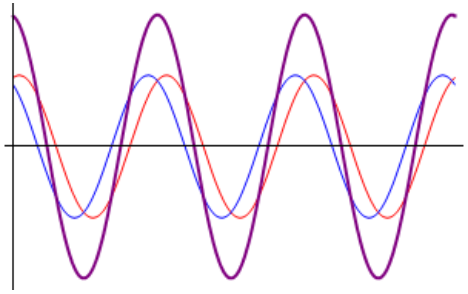
$$v_{y,\,\text{máx}} = \omega A$$

$$a_{y,\,\text{máx}} = \omega^2 A$$

La rapidez transversal y la aceleración transversal de los elementos de la cuerda no llegan simultáneamente a sus valores máximos. La rapidez transversal llega a su valor máximo (ωA) cuando $y = 0$, mientras que la magnitud de la aceleración transversal llega a su valor máximo ($\omega^2 A$) cuando $y = \pm A$.

Pregunta rápida La amplitud de una onda se duplica, sin que se hagan otros cambios a la onda. Como resultado de esta duplicación, ¿cuál de los siguientes enunciados es correcto? a) La rapidez de la onda cambia. b) La frecuencia de la onda cambia. c) La máxima rapidez transversal de un elemento del medio cambia. d) Los enunciados del inciso a) al c) son todos verdaderos. e) Ninguno de los enunciados del inciso a) al c) es verdadero.





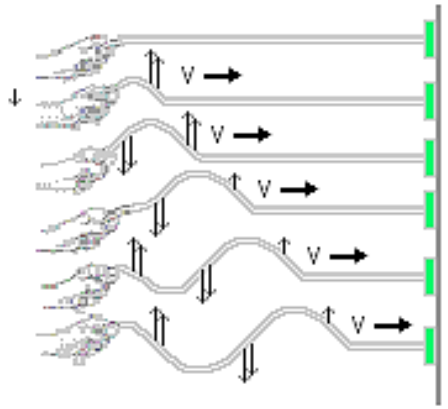
La rapidez de ondas en cuerdas

Si una cuerda bajo tensión se jala hacia los lados y luego se libera, la fuerza de tensión es responsable por acelerar un elemento particular de la cuerda de regreso hacia su posición de equilibrio. De acuerdo con la segunda ley de Newton, la aceleración del elemento aumenta con tensión creciente. Si el elemento regresa al equilibrio más rápidamente debido a esta aceleración aumentada, intuitivamente se argumentaría que la rapidez de la onda es mayor. En consecuencia, se espera que la rapidez de la onda aumente con tensión creciente.

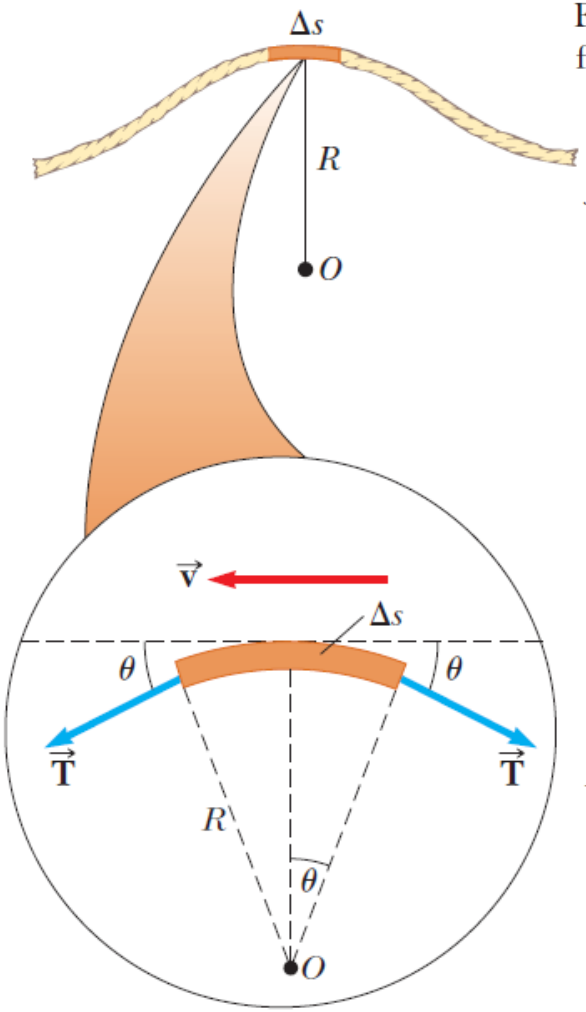
Del mismo modo, ya que es más difícil acelerar un elemento pesado de la cuerda que un elemento ligero, la rapidez de la onda debe disminuir a medida que aumente la masa por unidad de longitud de la cuerda. Si la tensión en la cuerda es T y su masa por unidad de longitud es μ (letra griega mu), la rapidez de onda, como se demostrará, es

Rapidez de una onda sobre una cuerda estirada ▶

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$



La rapidez de ondas en cuerdas



El pequeño elemento de la cuerda de longitud Δs que se muestra en la figura forma un arco aproximado de un círculo de radio R.

En el marco de referencia móvil (que se mueve hacia la derecha con una rapidez v junto con el pulso), el elemento sombreado se mueve hacia la izquierda con una rapidez v. Este elemento tiene una aceleración centrípeta igual a v^2/R, que la proporcionan los elementos de la fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ cuya magnitud es la tensión en la cuerda. La fuerza $\vec{\mathbf{T}}$ actúa a ambos lados del elemento y es tangente al arco, como se muestra en la figura.

Las componentes horizontales de $\vec{\mathbf{T}}$ se cancelan y cada componente vertical T sen θ actúa radialmente hacia el centro del arco. Por eso, la fuerza radial total sobre el elemento es $2T$ sen θ. Ya que el elemento es pequeño, θ es pequeño, y por lo tanto se puede usar la aproximación de ángulo pequeño sen $\theta \approx \theta$. De este modo, la fuerza radial total es

$$F_r = 2T \operatorname{sen} \theta \approx 2T\theta$$

El elemento tiene una masa $m = \mu\Delta s$. Ya que el elemento forma parte de un círculo y subtiende a un ángulo 2θ en el centro, $\Delta s = R(2\theta)$ y

$$m = \mu\Delta s = 2\mu R\theta$$

Al aplicar a este elemento la segunda ley de Newton en la dirección radial se obtiene

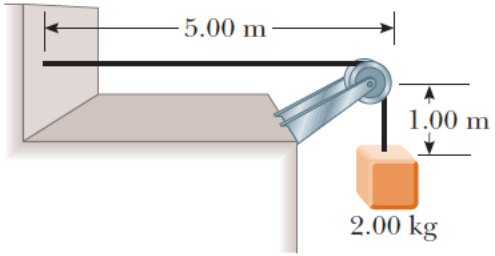
$$F_r = ma = \frac{mv^2}{R}$$

$$2T\theta = \frac{2\mu R\theta v^2}{R} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Advierta que esta deducción es de acuerdo con la suposición de que la altura del pulso es pequeña en relación con la longitud de la cuerda. Al usar esta suposición, se tiene posibilidad de usar la aproximación sen $\theta \approx \theta$. Además, el modelo supone que la tensión T no es afectada por la presencia del pulso; en consecuencia, T es la misma en todos los puntos en la cuerda. Por último, esta prueba *no* supone alguna forma particular para el pulso. Por lo tanto, un pulso *de cualquier forma* viaja a lo largo de la cuerda con rapidez $v = \sqrt{T/\mu}$ sin cambio alguno en la forma del pulso.

EJEMPLO **La rapidez de un pulso en una cuerda**

Una cuerda uniforme tiene una masa de 0.300 kg y una longitud de 6.00 m (figura 16.12). La cuerda pasa sobre una polea y soporta un objeto de 2.00 kg. Encuentre la rapidez de un pulso que viaje a lo largo de esta cuerda.



(Ejemplo 16.3) La tensión T en la cuerda se mantiene mediante el objeto suspendido. La rapidez de cualquier onda que viaje a lo largo de la cuerda está dada por $v = \sqrt{T/\mu}$.

SOLUCIÓN

Aplique al bloque el modelo de partícula en equilibrio:

$$\sum F_y = T - m_{\text{bloque}} g = 0$$

Resuelva para la tensión en la cuerda: $T = m_{\text{bloque}} g$

encontrar la rapidez de la onda,
use $\mu = m_{\text{cuerda}}/\ell$ para la densidad de masa lineal de la cuerda:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{m_{\text{bloque}} g \ell}{m_{\text{cuerda}}}}$$

Evalúe la rapidez de la onda: $v = \sqrt{\dfrac{(2.00\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)(6.00\ \text{m})}{0.300\ \text{kg}}} = 19.8\ \text{m/s}$

EJEMPLO **Rescate del excursionista**

Un excursionista de 80.0 kg queda atrapado en la saliente de una montaña después de una tormenta. Un helicóptero rescata al excursionista: se mantiene encima de él y le baja un cable, la masa del cable es de 8.00 kg y su longitud de 15.0 m. El cable se amarra a un cabestrillo de 70.0 kg de masa. El excursionista se ata al cabestrillo y después el helicóptero acelera hacia arriba. Aterrorizado por colgar del cable a mitad del aire, el excursionista intenta enviar señales al piloto lanzando pulsos transversales por el cable. Un pulso tarda 0.250 s en recorrer la longitud del cable. ¿Cuál es la aceleración del helicóptero?

SOLUCIÓN

Use el intervalo de tiempo en que el pulso viaja del excursionista al helicóptero para encontrar la rapidez de los pulsos en el cable:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{15.0\ \text{m}}{0.250\ \text{s}} = 60.0\ \text{m/s}$$

Resuelva la ecuación para la tensión en el cable:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \rightarrow \quad T = \mu v^2$$

Modele al excursionista y el cabestrillo como una partícula bajo una fuerza neta, y note que la aceleración de esta partícula de masa m es la misma que la aceleración del helicóptero:

$$\sum F = ma \quad \rightarrow \quad T - mg = ma$$

Resuelva para la aceleración:

$$a = \frac{T}{m} - g = \frac{\mu v^2}{m} - g = \frac{m_{\text{cable}} v^2}{\ell_{\text{cable}} m} - g$$

Sustituya valores numéricos:

$$a = \frac{(8.00\ \text{kg})(60.0\ \text{m/s})^2}{(15.0\ \text{m})(150.0\ \text{kg})} - 9.80\ \text{m/s}^2 = 3.00\ \text{m/s}^2$$

Velocidad de propagación de ondas mecánicas

- La velocidad de propagación de ondas transversales en una cuerda depende de la tensión (T) a la que está sometida y de su masa por unidad de longitud (μ)

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

- La velocidad del sonido en el aire en función de la temperatura absoluta (T) del aire es:

$$v = c\sqrt{T}$$ siendo c una constante

- La velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un sólido, depende de su coeficiente de dilatación, denominado módulo de Young (Y) y de su densidad (ρ)

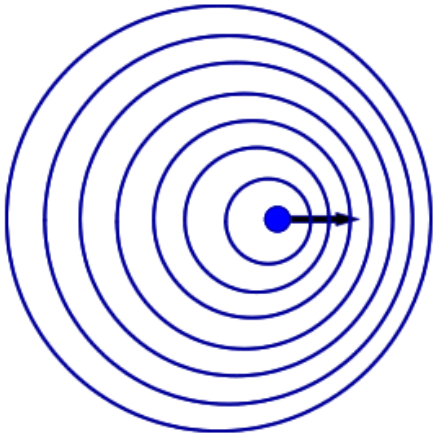
$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

- La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas, excepto en el vacío, depende de una característica del medio en el que se propagan, como la permitividad magnética (μ) y la constante dieléctrica (ε)

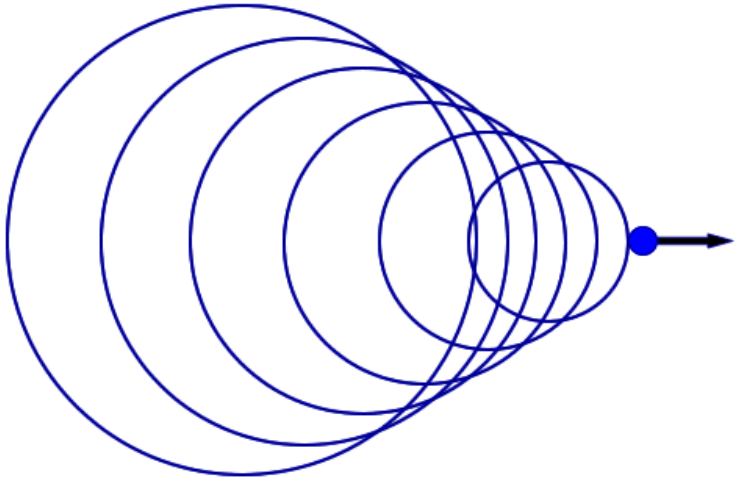
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\,\varepsilon}}$$

Propagación del Sonido

Las ondas viajan con una rapidez específica, y esta rapidez depende de las propiedades del medio perturbado. Por ejemplo, las ondas sonoras viajan a través de aire a temperatura ambiente con una rapidez aproximada de 343 m/s (781 mi/h), mientras que en la mayoría de los sólidos viajan con una rapidez mayor a 343 m/s.



Propagación del sonido cuando nos desplazamos a velocidad subsónica



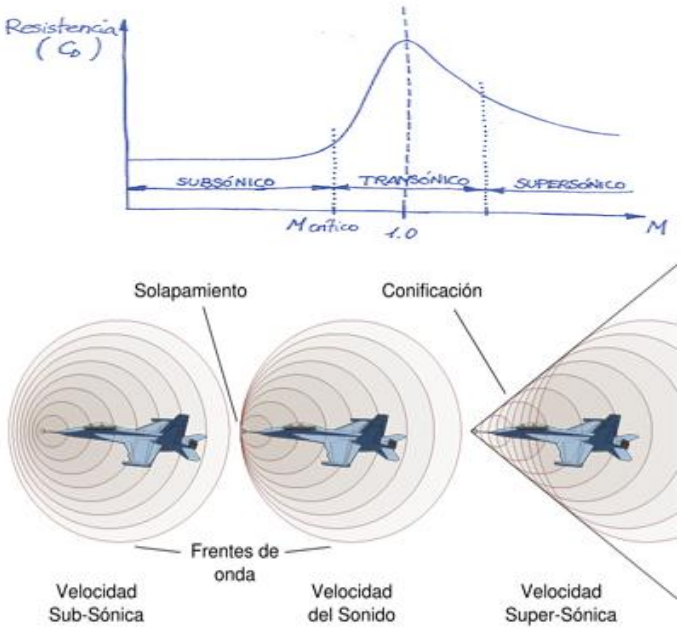
Propagación del sonido cuando nos desplazamos a velocidad supersónica

Ondas Supersónicas

Cuando un avión se acerca a la velocidad del sonido, las ondas sonoras que genera, debido a que se desplazan casi a la misma velocidad que el aparato, no pueden adelantarlo con lo que se van acumulando delante del avión formando el muro de aire comprimido (el sonido no es otra cosa mas que una compresión del aire). Al llegar a la velocidad del sonido, se produce de forma brusca una modificación en la compresibilidad del aire, llamada onda de choque. El resultado de esta distorsión incrementa la resistencia al avance del avión que afecta a la sustentación del ala y a los mandos de vuelo. Por tanto, en los aviones que no estén adecuadamente diseñados, es imposible controlar el vuelo.

Cuando el avión acelera por encima de la velocidad del sonido, adelanta a este muro (el sonido va ahora mas despacio que el avión, con lo que las ondas ya no pueden seguirlo) "rompiéndolo"; esta rotura provoca el llamado "estampido sónico".

Cuando el valor del Mach (o M, la velocidad del avión dividida entre la del sonido) se acerca a uno, la fuerza de resistencia aerodinámica se “dispara”.

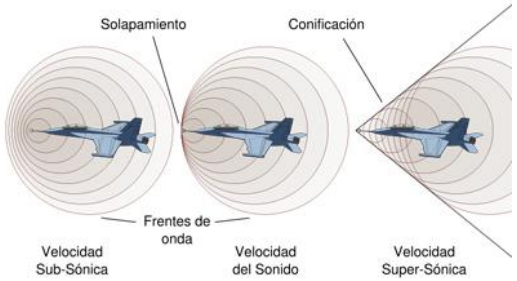


Ondas Supersónicas

¿Por qué se produce una explosión cuando se rompe la barrera del sonido?

Cuando un objeto **sobrepasa la velocidad del sonido** (340 m/s, unos 1230 Km/h) se produce la conocida **explosión sónica**, tan espectacular de escuchar como de ver, ya que crea efectos en ambos sentidos.

Lo que vemos cuando un avión rompe la barrera del sonido es, en primer lugar, **un cono de vapor de agua** que rodea la cola del avión, **y a continuación se escucha un gran estruendo** (de unos 200dB). En realidad son dos, uno en la cabeza y otro en la cola, pero suelen ocurrir tan juntos que se perciben como uno solo.



Finalmente, al alcanzar la barrera, **se libera rápidamente la energía acumulada en una explosión sónica, lo que produce un cambio brusco de presión** que crea la condensación de vapor de agua que vemos en la cola.

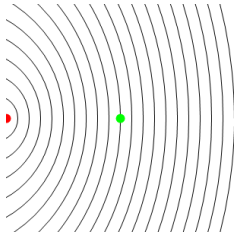
Curiosamente, **el piloto del avión no escuchará nada** y de hecho a penas lo notará. Esto ocurre gracias a que el sonido generado viaja más despacio que el avión por lo que no alcanza la cabina del piloto.

Por último, recordar que **este fenómeno no es exclusivo de los aviones**, aunque claramente es el caso más espectacular. El efecto **se produce también** a menor escala (y sin efecto visual) en lugares más cotidianos como **el chasquido que se produce en la punta de un látigo**. Al darle impulso, éste se desplaza a lo largo del látigo que va reduciendo su masa a medida que se acerca a la punta donde su masa es casi 0, y dado que la energía es constante, se produce una brusca liberación de energía.

Ondas Supersónicas

Veamos la explicación matemática de este choque sónico. La frecuencia que percibe un observador en reposo se puede expresa con esta ecuación,

$$f' = f.\left(\frac{1}{1 \pm \frac{v_s}{v}}\right)$$



siendo Vs la velocidad del móvil y V la velocidad del sonido. Cuando el móvil se aproxima a V lo entenderemos como un límite:

$$f' = \lim_{v_s \to v} f.\left(\frac{1}{1 \pm \frac{v_s}{v}}\right)$$

Frecuencia	Sonido	Vibración
Baja	Grave	Lenta
Alta	Agudo	Rápida

El **número Mach**

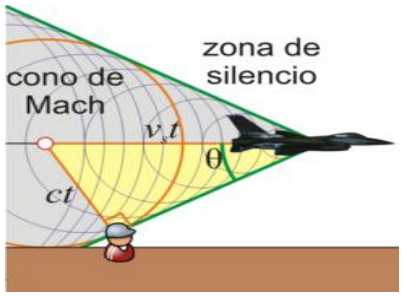
$$M = \frac{V}{V_s}$$

- Subsónico M < 0,7
- Transónico 0,7 < M < 1,2
- Supersónico 1,2 < M < 5
- Hipersónico M > 5

Ernst Mach (1838-1916)

Cuando se igualen Vs y V (momento en que se alcanza la velocidad del sonido) se anulará el denominador, dando lugar a una división por 0, que conocemos como singularidad matemática, justo cuando se produce la explosión sónica.

$$Si\ v_s = v \Rightarrow \frac{v_s}{v} = 1 \quad f' = f.\left(\frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}\right) = f.\left(\frac{1}{1-1}\right) = f.\left(\frac{1}{0}\right)$$

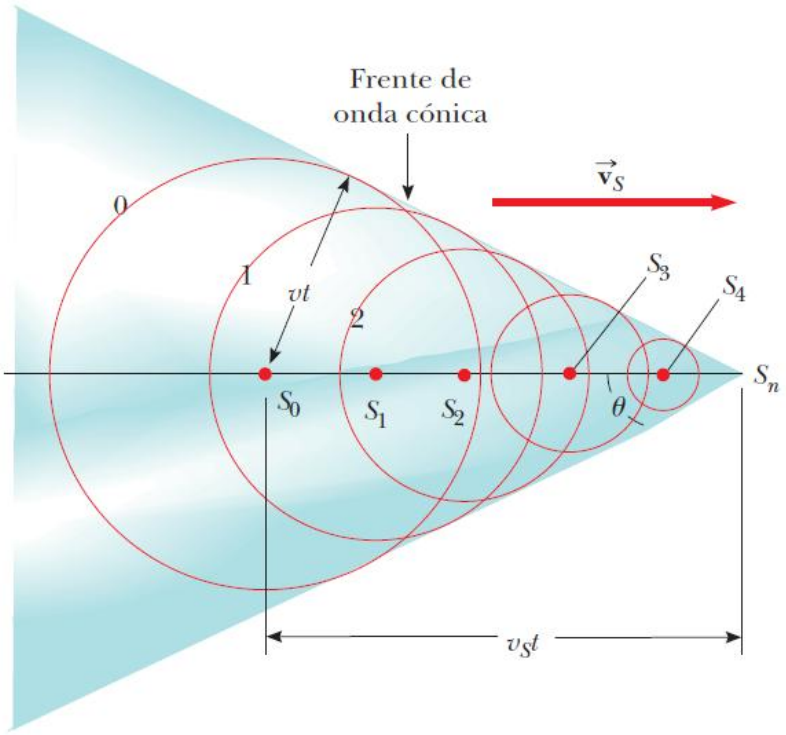


Volando a Mach 2 con el techo de la cabina abierto:

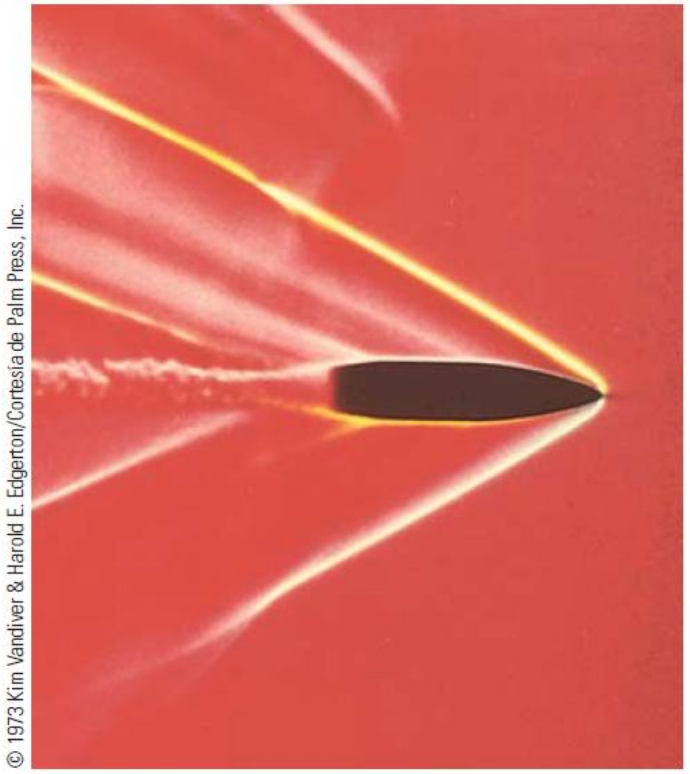
Cuando sacas la mano y la velocidad es de unas dos veces la velocidad del sonido, se te calientan debido a la inmensa fuerza de la fricción.

Esta vez se dispara un revólver. Se puede apreciar claramente que hay dos esferas de sonido, la de la boca del arma y la del tambor.

Ondas de choque



a)



b)

Figura 17.10 a) Una representación de una onda de choque producida cuando una fuente se mueve de S_0 a S_n con una rapidez v_S, que es mayor que la rapidez de onda v en el medio. La envolvente de los frentes de onda forman un cono cuyo semiángulo del vértice se conoce por sen $\theta = v/v_S$. b) Fotografía estroboscópica de una bala que se mueve con rapidez supersónica a través del aire caliente sobre una vela. Advierta la onda de choque en la vecindad de la bala.

La envolvente de estos frentes de onda es un cono cuyo semiángulo del vértice θ (el "ángulo Mach") se conoce por

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{vt}{v_S t} = \frac{v}{v_S}$$

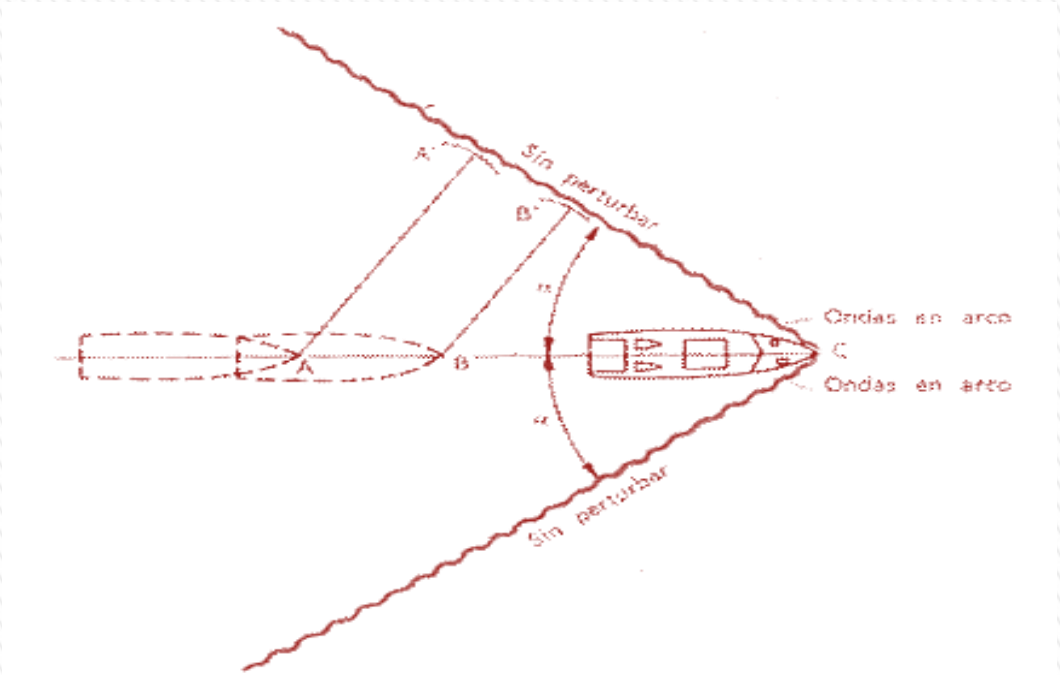
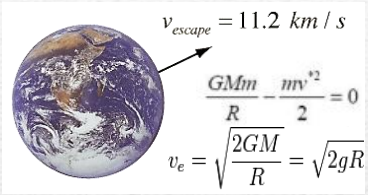
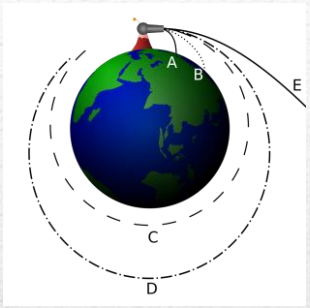


Figura 17.11 La onda de proa con forma en V de un bote se forma debido a que la rapidez del bote es mayor que la rapidez de las ondas del agua que genera. Una onda de proa es análoga a una onda de choque formada por un avión que viaja más rápido que el sonido.

La relación v_S/v se conoce como *número Mach*, y el frente de onda cónico que se produce cuando $v_S > v$ (rapidez supersónica) se conoce como *onda de choque*. Una analogía interesante con las ondas de choque son los frentes de onda con forma en V producidos por un bote (la onda de proa) cuando la rapidez del bote supera la rapidez de las ondas en la superficie del agua (figura 17.11).

Velocidad de Escape





La velocidad de escape desde la superficie de la Tierra es 11,2 km/s que equivale a 40 320 km/h

Reflexión y transmisión

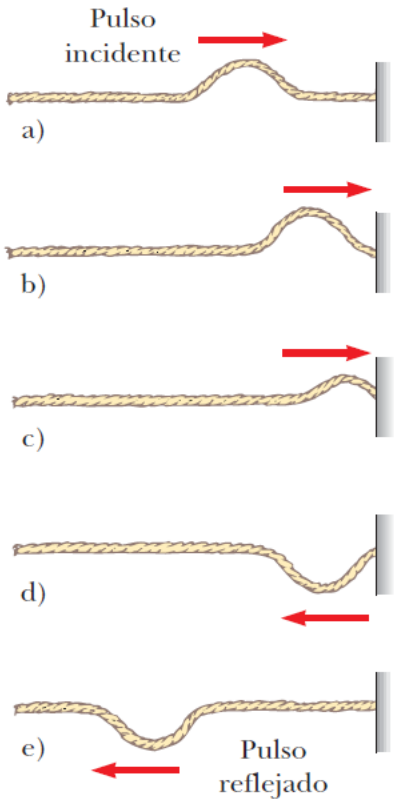


Figura 16.13 Reflexión de un pulso viajero en el extremo fijo de una cuerda estirada. El pulso reflejado está invertido, pero su forma no cambia de otra manera.

Note que el pulso reflejado está *invertido*. Esta inversión se explica del modo siguiente: cuando el pulso alcanza el extremo fijo de la cuerda, ésta produce una fuerza hacia arriba sobre el soporte. Por la tercera ley de Newton, el soporte debe ejercer sobre al cuerda una fuerza de reacción de igual magnitud y con dirección opuesta (hacia abajo). Esta fuerza hacia abajo hace que el pulso se invierta en la reflexión.

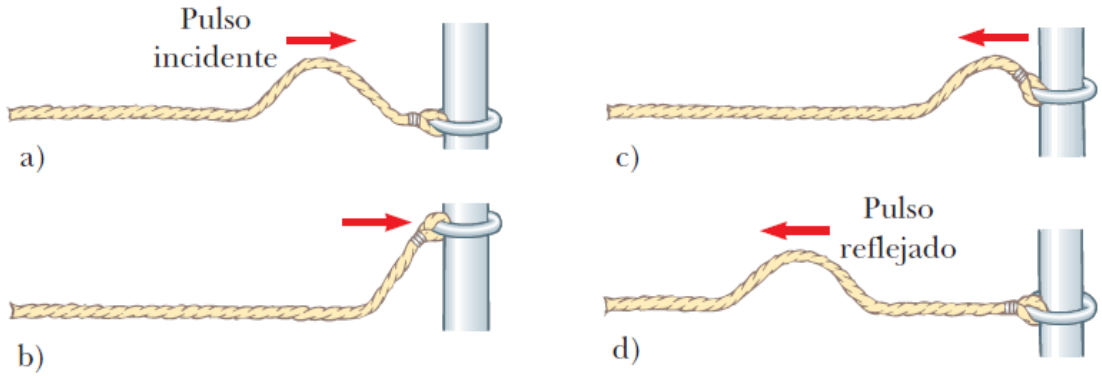


Figura 16.14 Reflexión de un pulso viajero en el extremo libre de una cuerda estirada. El pulso reflejado no está invertido.

Cuando llega al poste, el pulso ejerce una fuerza sobre el extremo libre de la cuerda, lo que hace que el anillo acelere hacia arriba. El anillo se eleva tan alto como el pulso entrante, y luego la componente hacia abajo de la fuerza de tensión jala el anillo de vuelta hacia abajo.

Reflexión y transmisión

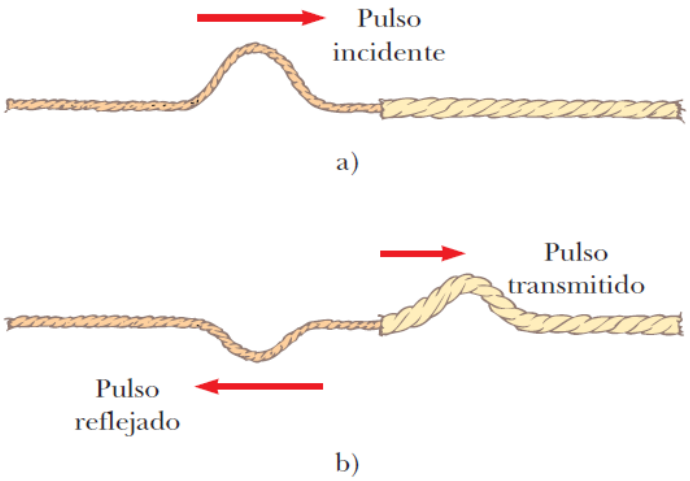


Figura 16.15 a) Pulso que viaja a la derecha sobre una cuerda ligera unida a una cuerda más pesada. b) Parte del pulso incidente se refleja (e invierte) y parte se transmite a la cuerda más pesada.

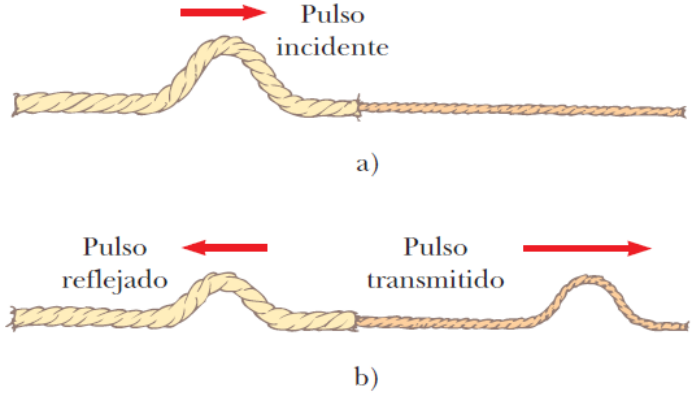


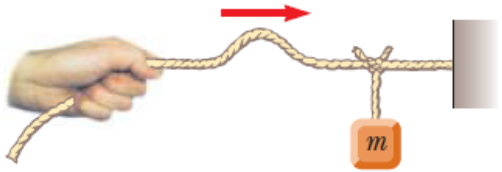
Figura 16.16 a) Pulso que viaja hacia la derecha sobre una cuerda pesada unida a una cuerda más ligera. b) El pulso incidente tiene un reflejo parcial y se transmite en partes, y el pulso reflejado no se invierte.

De acuerdo con la ecuación 16.18, la rapidez de una onda sobre una cuerda aumenta a medida que disminuye la masa por unidad de longitud de la cuerda. En otras palabras, una onda viaja más lentamente en una cuerda pesada que sobre una cuerda ligera, si ambas están bajo la misma tensión. Las siguientes reglas generales se aplican a las ondas reflejadas: **cuando una onda o pulso viaja del medio A al medio B y $v_A > v_B$ (es decir, cuando B es más denso que A), se invierte en la reflexión. Cuando una onda o pulso viaja del medio A al medio B y $v_A < v_B$ (es decir, cuando A es más denso que B), no se invierte en la reflexión.**

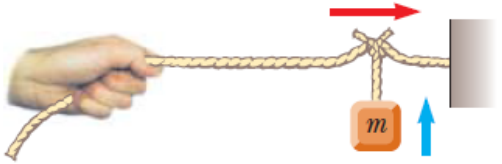
$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Rapidez de transferencia de energía mediante ondas sinusoidales en cuerdas

Las ondas transportan energía a través de un medio mientras se propagan.



a)



b)

Figura 16.17 a) Pulso que viaja hacia la derecha sobre una cuerda estirada que tiene un objeto suspendido en ella. b) Cuando el pulso llega, se transmite energía al objeto suspendido.

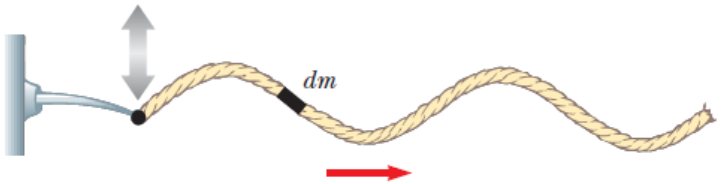


Figura 16.18 Una onda sinusoidal que viaja a lo largo del eje *x* sobre una cuerda estirada. Todo elemento de la cuerda se mueve verticalmente y todo elemento tiene la misma energía total.

Concentre su atención en un elemento infinitesimal de la cuerda de longitud dx y masa dm. Cada uno de tales elementos se mueve verticalmente con movimiento armónico simple. Por lo tanto, cada elemento de la cuerda se modela como un oscilador armónico simple, con la oscilación en la dirección y. Todos los elementos tienen la misma frecuencia angular ω y la misma amplitud A. La energía cinética K asociada con una partícula móvil es $K = \frac{1}{2}mv^2$. Si esta ecuación se aplica al elemento infinitesimal, la energía cinética dK de este elemento es

$$dK = \tfrac{1}{2}(dm)v_y^{\,2}$$

donde v_y es la rapidez transversal del elemento. Si μ es la masa por unidad de longitud de la cuerda, la masa dm del elemento de longitud dx es igual a $\mu\, dx$. Por tanto, la energía cinética de un elemento de la cuerda se expresa como

$$dK = \tfrac{1}{2}(\mu\, dx)v_y^{\,2} \qquad (16.19)$$

Rapidez de transferencia de energía mediante ondas sinusoidales en cuerdas

Las ondas transportan energía a través de un medio mientras se propagan.

Al sustituir con la ecuación 16.14 para la rapidez transversal general de un oscilador armónico simple se obtiene

$$dK = \tfrac{1}{2}\mu[-\omega A \cos{(kx - \omega t)}]^2\, dx = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2{(kx - \omega t)}\, dx$$

Si se toma una instantánea de la onda en el tiempo $t = 0$, la energía cinética de un elemento dado es

$$dK = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2{(kx)}\, dx$$

Al integrar esta expresión sobre todos los elementos de cuerda en una longitud de onda de la onda produce la energía cinética total K_A en una longitud de onda:

$$K_\lambda = \int dK = \int_0^\lambda \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \cos^2{(kx)}\, dx = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \int_0^\lambda \cos^2{(kx)}\, dx$$

$$= \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \left[\tfrac{1}{2}x + \frac{1}{4k}\operatorname{sen} 2kx\right]_0^\lambda = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2\left[\tfrac{1}{2}\lambda\right] = \tfrac{1}{4}\mu\omega^2 A^2\lambda$$

Rapidez de transferencia de energía mediante ondas sinusoidales en cuerdas

Además de la energía cinética, hay energía potencial asociada con cada elemento de la cuerda debido a su desplazamiento de la posición de equilibrio y las fuerzas restauradoras de elementos colindantes. Un análisis similar al anterior para la energía potencial total U_A en una longitud de onda produce exactamente el mismo resultado:

$$U_\lambda = \tfrac{1}{4}\mu\omega^2 A^2 \lambda$$

La energía total en una longitud de onda de la onda es la suma de las energías potencial y cinética:

$$E_\lambda = U_\lambda + K_\lambda = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda \qquad \textbf{(16.20)}$$

A medida que la onda se mueve a lo largo de la cuerda, esta cantidad de energía pasa por un punto determinado en la cuerda durante un intervalo de tiempo de un periodo de la oscilación. Por lo tanto, la potencia $\mathcal{P}$, o rapidez de transferencia de energía T_{OM} asociada con la onda mecánica, es

$$\mathcal{P} = \frac{T_{\text{OM}}}{\Delta t} = \frac{E_\lambda}{T} = \frac{\tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \lambda}{T} = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \left(\frac{\lambda}{T}\right) \qquad \textbf{(16.21)}$$

Potencia de una onda ▶ $\mathcal{P} = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v$

EJEMPLO 16.5 Potencia suministrada a una cuerda en vibración

Una cuerda tensa para la que $\mu = 5.00 \times 10^{-2}$ kg/m está bajo una tensión de 80.0 N. ¿Cuánta potencia se debe suministrar a la cuerda para generar ondas sinusoidales a una frecuencia de 60.0 Hz y una amplitud de 6.00 cm?

SOLUCIÓN

Evalúe la rapidez de onda sobre la cuerda a partir de la ecuación 16.18:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{80.0 \text{ N}}{5.00 \times 10^{-2} \text{ kg/m}}} = 40.0 \text{ m/s}$$

Calcule la frecuencia angular ω de las ondas sinusoidales sobre la cuerda a partir de la ecuación 16.9:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(60.0 \text{ Hz}) = 377 \text{ s}^{-1}$$

Use estos valores y $A = 6.00 \times 10^{-2}$ m en la ecuación 16.1 para evaluar la potencia:

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v \\ &= \tfrac{1}{2}(5.00 \times 10^{-2} \text{ kg/m})(377 \text{ s}^{-1})^2(6.00 \times 10^{-2} \text{ m})^2(40.0 \text{ m/s}) \\ &= 512 \text{ W} \end{aligned}$$

¿Qué pasaría si? ¿Y si la cuerda debe transferir energía a una rapidez de 1 000 W? ¿Cuál debe ser la amplitud requerida si todos los otros parámetros permanecen iguales?

Respuesta Establezca una relación de la potencia nueva a la anterior, que refleje sólo un cambio en la amplitud:

$$\frac{\mathcal{P}_{\text{nueva}}}{\mathcal{P}_{\text{anterior}}} = \frac{\tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A_{\text{nueva}}^2 v}{\tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A_{\text{anterior}}^2 v} = \frac{A_{\text{nueva}}^2}{A_{\text{anterior}}^2}$$

Al resolver para la nueva amplitud se obtiene

$$A_{\text{nueva}} = A_{\text{anterior}}\sqrt{\frac{\mathcal{P}_{\text{nueva}}}{\mathcal{P}_{\text{anterior}}}} = (6.00 \text{ cm})\sqrt{\frac{1\,000 \text{ W}}{512 \text{ W}}} = 8.39 \text{ cm}$$

La ecuación de onda lineal

Suponga que una onda viajera se propaga a lo largo de una cuerda que está bajo una tensión T. Considere un pequeño elemento de cuerda de longitud Δx (figura 16.19). Los extremos del elemento forman pequeños ángulos θ_A y θ_B con el eje x. La fuerza neta que actúa sobre el elemento en la dirección vertical es

$$\sum F_y = T \operatorname{sen} \theta_B - T \operatorname{sen} \theta_A = T(\operatorname{sen} \theta_B - \operatorname{sen} \theta_A)$$

Ya que los ángulos son pequeños, se puede usar la aproximación de ángulo pequeño $\operatorname{sen} \theta \approx \tan \theta$ para expresar la fuerza neta como

$$\sum F_y \approx T(\tan \theta_B - \tan \theta_A) \qquad \textbf{(16.22)}$$

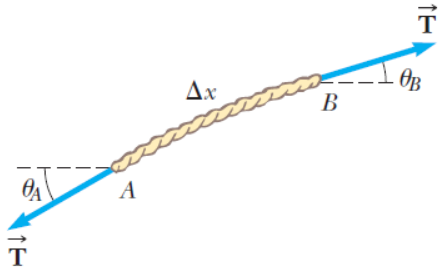


Figura 16.19 Un elemento de cuerda bajo tensión T.

Al sustituir para las tangentes en la ecuación

$$\sum F_y \approx T\left[\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_B - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_A\right] \qquad \textbf{(16.23)}$$

Ahora aplique la segunda ley de Newton al elemento, con la masa del elemento conocido por $m = \mu\, \Delta x$:

$$\sum F_y = ma_y = \mu \Delta x \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right) \qquad \textbf{(16.24)}$$

Al combinar la ecuación 16.23 con la ecuación 16.24 se obtiene

$$\mu \Delta x \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right) = T\left[\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_B - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_A\right]$$

$$\frac{\mu}{T}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{(\partial y/\partial x)_B - (\partial y/dx)_A}{\Delta x} \qquad \textbf{(16.25)}$$

La ecuación de onda lineal

El lado derecho de la ecuación 16.25 se expresa en una forma diferente si advierte que la derivada parcial de cualquier función se define como

$$\frac{\partial f}{\partial x} \equiv \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

Al asociar $f(x + \Delta x)$ con $(\partial y/\partial x)_B$ y $f(x)$ con $(\partial y/\partial x)_A$, se ve que, en el límite $\Delta x \to 0$, la ecuación 16.25 se convierte en

Ecuación de onda lineal para una cuerda ▶

$$\frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \qquad \textbf{(16.26)}$$

Esta expresión es la ecuación de onda lineal como se aplica a ondas en una cuerda.

La ecuación de onda lineal (ecuación 16.26) con frecuencia se escribe en la forma

Ecuación de onda lineal en general ▶

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \qquad \textbf{(16.27)}$$

la ecuación de onda lineal es satisfecha por *cualquier* función de onda que tenga la forma $y = f(x \pm vt)$.

Resumen

DEFINICIONES

Una **onda sinusoidal** unidimensional es aquella para la cual las posiciones de los elementos del medio varían en forma sinusoidal. Una onda sinusoidal que viaja hacia la derecha se puede expresar con una **función de onda**

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right] \qquad \textbf{(16.5)}$$

donde A es la **amplitud**, λ es la **longitud de onda** y v es la **rapidez de onda**.

El **número de onda angular** k y la **frecuencia angular** ω de una onda se definen del modo siguiente:

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \textbf{(16.8)}$$

$$\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad \textbf{(16.9)}$$

donde T es el **periodo** de la onda y f es su **frecuencia**

En una **onda transversal** los elementos del medio se mueven en una dirección *perpendicular* a la dirección de propagación. En una **onda longitudinal** los elementos del medio se mueven en una dirección *paralela* a la dirección de propagación.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

Cualquier onda unidimensional que viaja con una rapidez v en la dirección x se representa mediante una función de onda de la forma

$$y(x, t) = f(x \pm vt) \qquad \textbf{(16.1, 16.2)}$$

donde el signo positivo se aplica a una onda que viaja en la dirección x negativa y el signo negativo se aplica a una onda que viaja en la dirección x positiva. La forma de la onda en cualquier instante en el tiempo (una instantánea de la onda) se obtiene al mantener t constante.

La rapidez de una onda que viaja sobre una cuerda tensa de masa por unidad de longitud μ y tensión T es

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad \textbf{(16.18)}$$

Una onda se refleja total o parcialmente cuando llega al final del medio en el que se propaga o cuando llega a una frontera donde su rapidez cambia de manera discontinua. Si una onda que viaja en una cuerda alcanza un extremo fijo, la onda se refleja e invierte. Si la onda llega a un extremo libre, se refleja mas no se invierte.

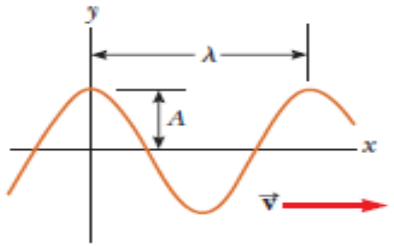
La **potencia** transmitida por una onda sinusoidal sobre una cuerda estirada es

$$\mathcal{P} = \tfrac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 v \qquad \textbf{(16.21)}$$

Las funciones de onda son soluciones a una ecuación diferencial llamada **ecuación de onda lineal:**

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \qquad \textbf{(16.27)}$$

MODELO DE ANÁLISIS PARA RESOLVER PROBLEMAS



Onda progresiva. La rapidez de onda de una onda sinusoidal es

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \qquad \textbf{(16.6, 16.12)}$$

Una onda sinusoidal se expresa como

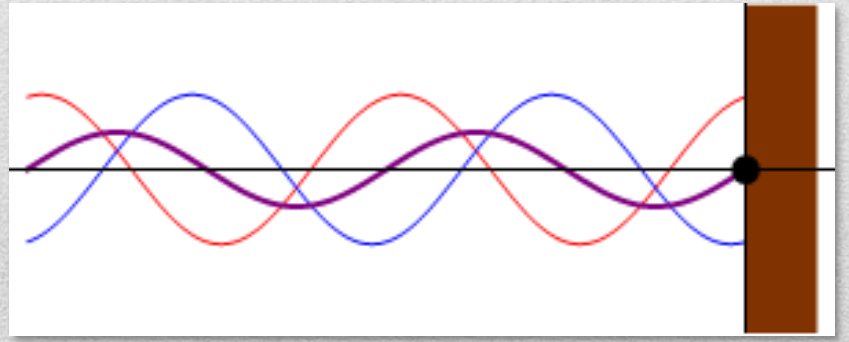
$$y = A\,\text{sen}\,(kx - \omega t) \qquad \textbf{(16.10)}$$

Curso de Física Avanzada

OSCILACIONES Y ONDAS MECÁNICAS

- Movimiento oscilatorio
- Movimiento ondulatorio
- Ondas sonoras
- Sobreposición y ondas estacionarias

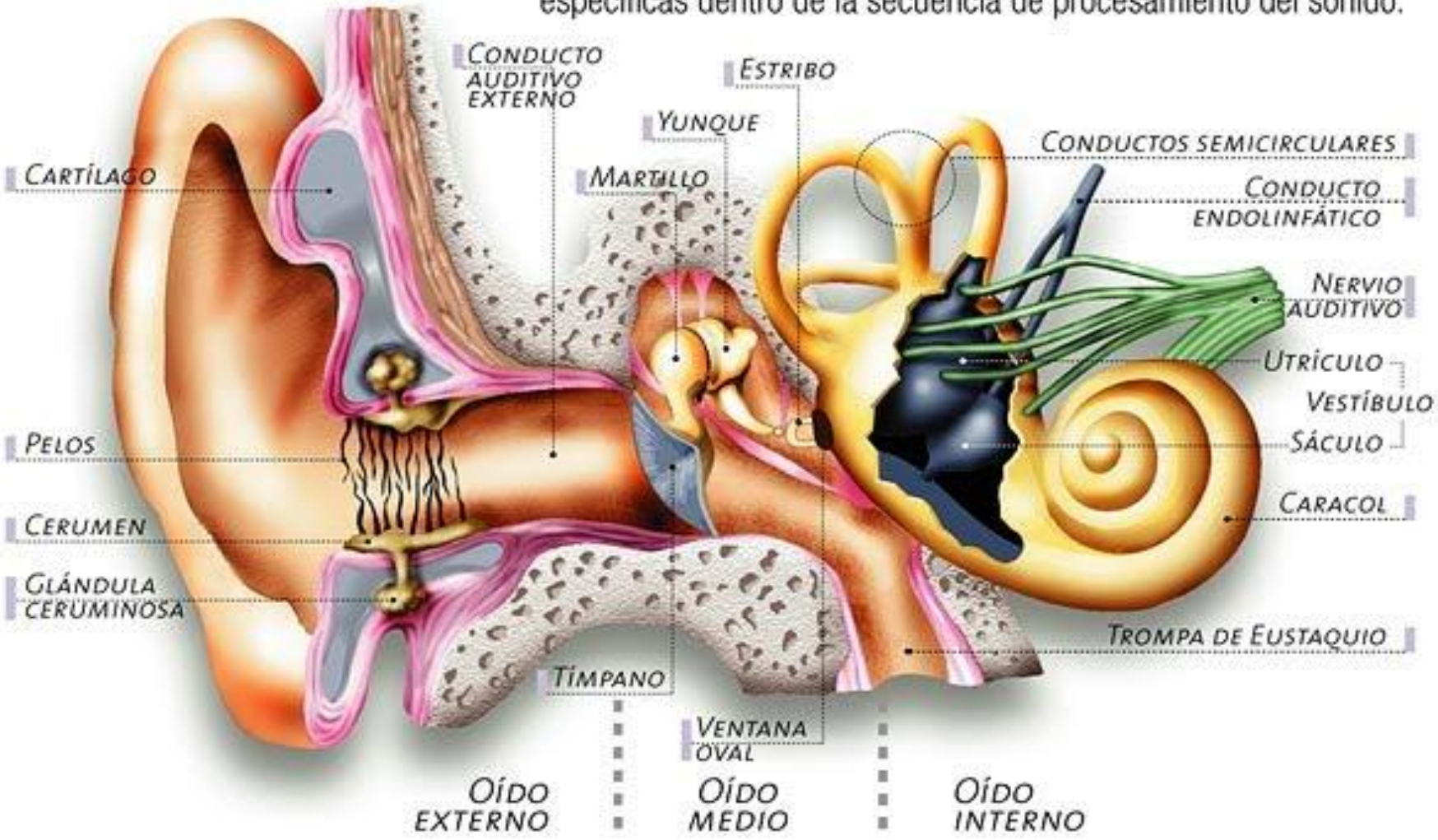
- Rapidez de ondas sonoras
- Ondas sonoras periódicas
- Intensidad de ondas sonoras periódicas
- El efecto Doppler
- Grabación de sonido digital
- Sonido cinematográfico



Los oídos humanos evolucionaron para detectar ondas sonoras e interpretarlas, como la música o el habla. Algunos animales, como este joven zorro orejas de murciélago, tienen oídos adaptados para detectar sonidos muy débiles.

El oído

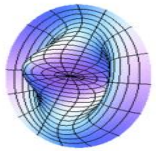
Una de las funciones principales del oído es la de convertir las ondas sonoras en vibraciones que estimulen las células nerviosas, para ello el oído tiene tres partes claramente identificadas. Estas secciones están interconectadas y son el oído externo, el medio y el interno. Cada parte tiene funciones específicas dentro de la secuencia de procesamiento del sonido.



Anatomía

El oído está compuesto de tres partes:

Simulación de la membrana del Tímpano



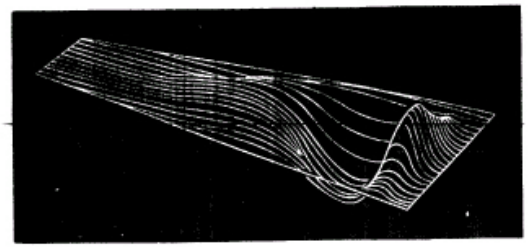
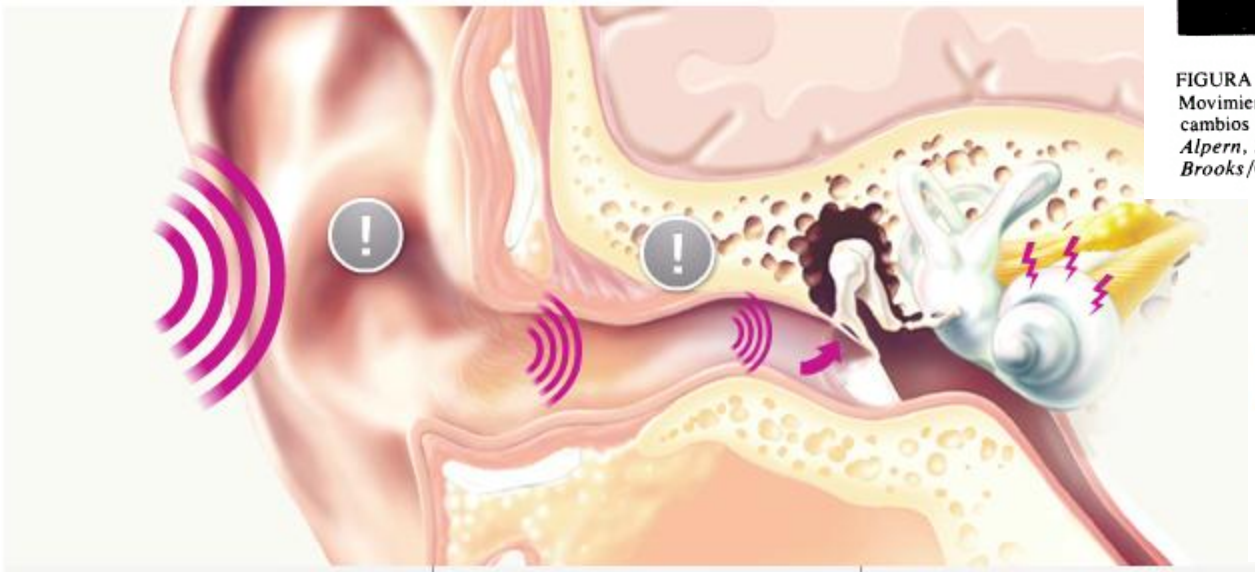
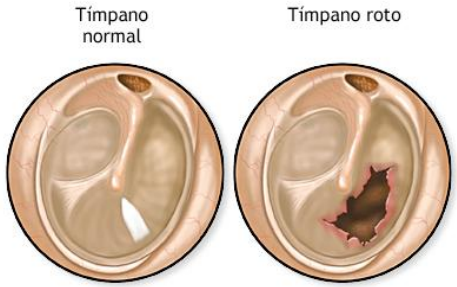


FIGURA 16-34
Movimiento ondular de la membrana basilar, en respuesta a los cambios de presión producidos en el oído interno. (*De M. Alpern, M. Lawrence y D. Wolsk, "Sensory Processes", Brooks/Cole Publishing Company, Belmont. Calif, 1968.*)

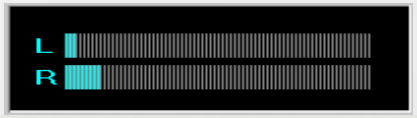




ADAM.

El oído externo

¿Se ha preguntado alguna vez por qué las orejas tienen la forma que tienen? La forma de sus orejas asegura que las ondas sonoras sean captadas y conducidas al tímpano a través del conducto auditivo.



El oído medio

El oído medio está compuesto por el tímpano y tres huesecillos: el martillo, el yunque y el estribo. De hecho, el estribo es el hueso más pequeño del cuerpo. Trabajan conjuntamente para amplificar las ondas sonoras.

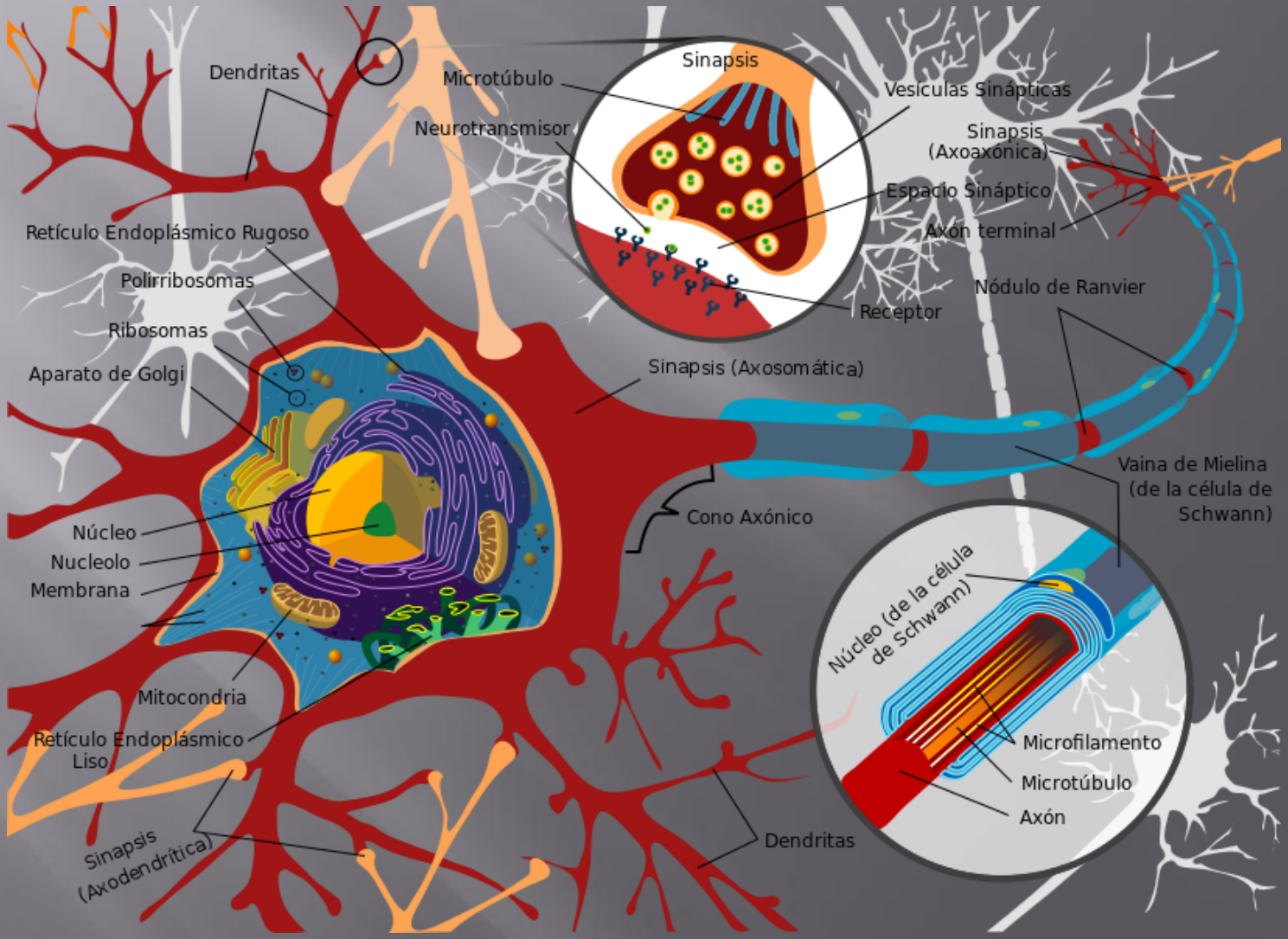
El oído interno

El procesamiento empieza en el oído interno, donde las ondas sonoras se transforman en impulsos eléctricos. La cóclea (también conocida como caracol) está rellena de un líquido que las ondas sonoras mueven y cuyo movimiento es capturado por las células sensoriales que

El cerebro

Una vez que se envían los impulsos al cerebro, este procesa los datos para que podamos seleccionar lo que es relevante en esa situación y seguirlo.

Las Neuronas



Las Neuronas

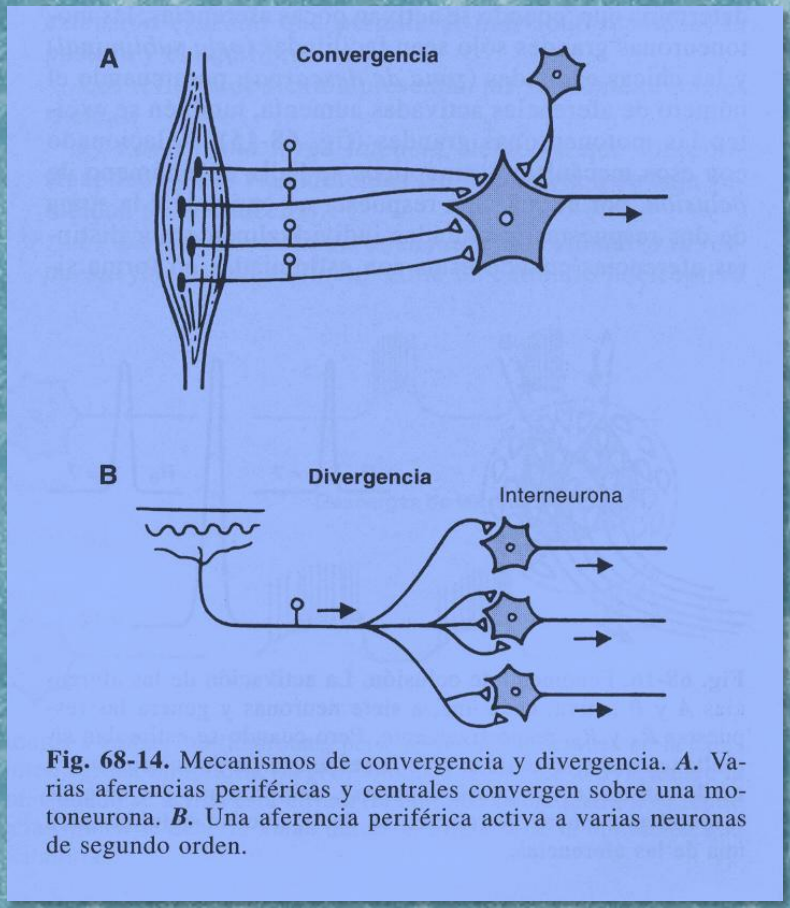
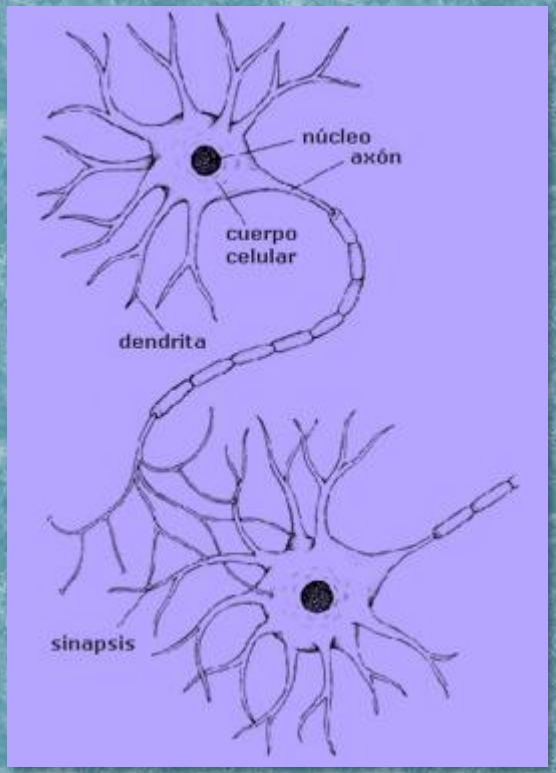
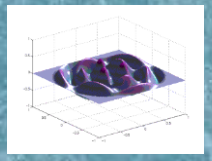


Fig. 68-14. Mecanismos de convergencia y divergencia. ***A.*** Varias aferencias periféricas y centrales convergen sobre una motoneurona. ***B.*** Una aferencia periférica activa a varias neuronas de segundo orden.





Circuitos Reverberantes

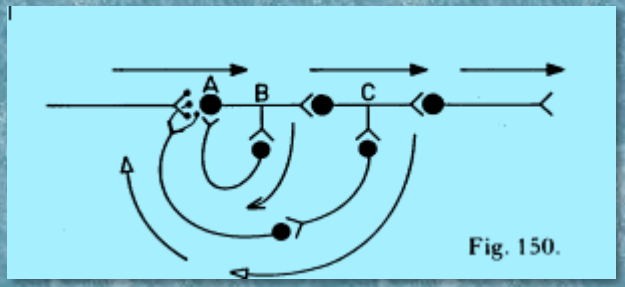


Fig. 150.

Rapidez de ondas sonoras

La rapidez de las ondas sonoras en un medio depende de la compresibilidad y la densidad del medio; si éste es un líquido o un gas y tiene un módulo volumétrico B (véase la sección 12.4) y densidad ρ, la rapidez de las ondas sonoras en dicho medio es

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad (17.1)$$

La rapidez del sonido también depende de la temperatura del medio. La relación entre la rapidez de la onda y la temperatura del aire, para sonido que viaja a través del aire, es

$$v = (331 \text{ m/s})\sqrt{1 + \frac{T_C}{273°C}}$$

donde 331 m/s es la rapidez del sonido en aire a 0°C y T_C es la temperatura del aire en grados Celsius. Con esta ecuación, uno encuentra que, a 20°C, la rapidez del sonido en el aire es aproximadamente 343 m/s.

Esta información proporciona una forma conveniente de estimar la distancia de una tormenta. Primero cuente el número de segundos entre ver el destello del relámpago y escuchar el trueno. Dividir este tiempo entre 3 da la distancia aproximada al relámpago en kilómetros, porque 343 m/s es aproximadamente $\frac{1}{3}$ km/s.

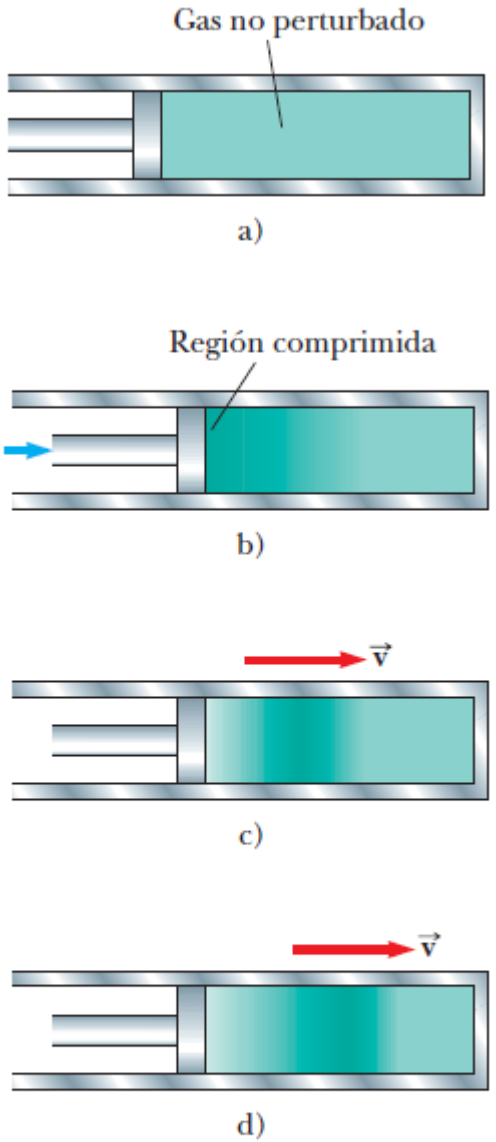


Figura 17.1 Movimiento de un pulso longitudinal a través de un gas compresible. La compresión (región más oscura) la produce el pistón en movimiento.

Rapidez de ondas sonoras

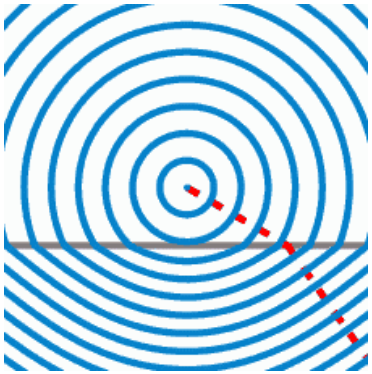
Estado	Medio	Velocidad (m/s)
Gaseoso	Aire (a 20°C)	340
	Hidrógeno (a 0°C)	1286
	Oxigeno (a 0°C)	317
	Helio (a 0°C)	972
Líquido	Agua (a 25°C)	1493
	Agua de mar (a 25°C)	1533
Sólido	Aluminio	5100
	Cobre	3560
	Hierro	5130
	Plomo	1322
	Caucho	54

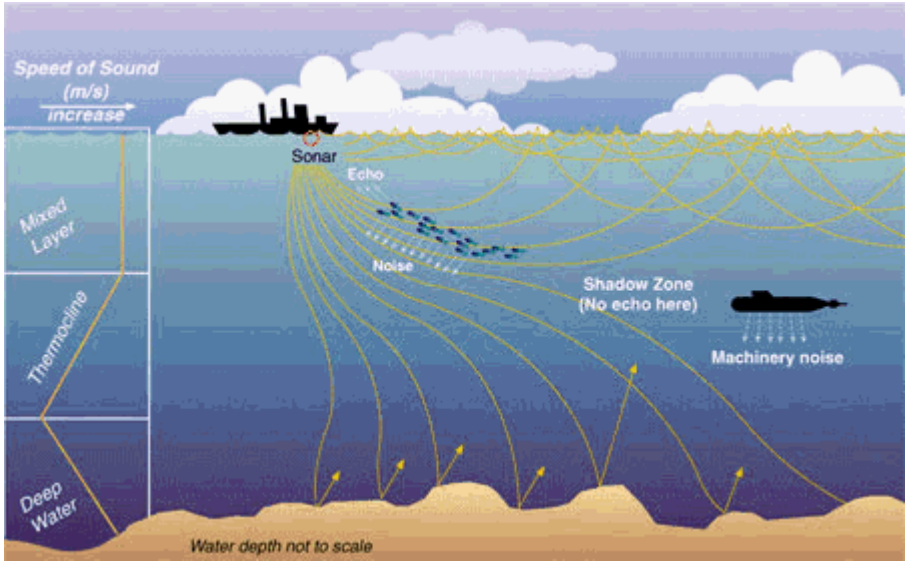
TABLA 17.1

Rapidez del sonido en diferentes medios

Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)
Gases		**Líquidos a 25°C**		**Sólidos**[a]	
Hidrógeno (0°C)	1 286	Glicerol	1 904	Vidrio Pyrex	5 640
Helio (0°C)	972	Agua de mar	1 533	Hierro	5 950
Aire (20°C)	343	Agua	1 493	Aluminio	6 420
Aire (0°C)	331	Mercurio	1 450	Latón	4 700
Oxígeno (0°C)	317	Queroseno	1 324	Cobre	5 010
		Alcohol metílico	1 143	Oro	3 240
		Tetracloruro de carbono	926	Lucita	2 680
				Plomo	1 960
				Caucho	1 600

[a] Los valores conocidos son para propagación de ondas longitudinales en medios volumétricos. Las magnitudes de velocidad para ondas longitudinales en barras delgadas son menores, y las magnitudes de velocidad de ondas transversales en volumen son aún más pequeñas.





En general, la velocidad del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y en los líquidos es mayor que en los gases. Esto se debe al mayor grado de cohesión que tienen los enlaces atómicos o moleculares conforme más sólida es la materia.

Ondas sonoras periódicas

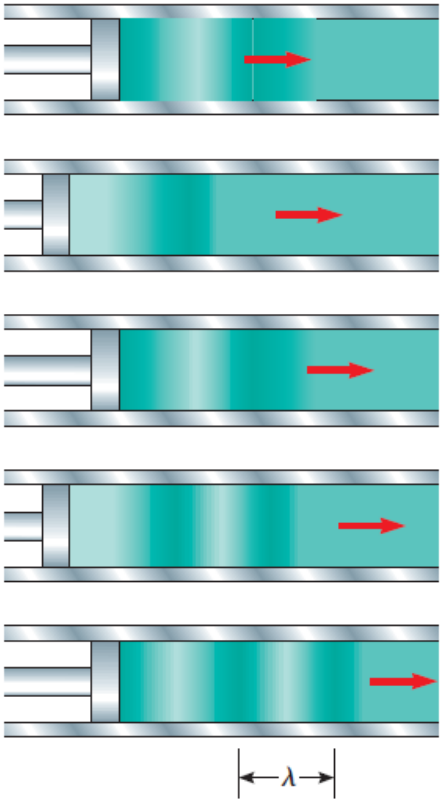


Figura 17.2 Una onda longitudinal que se propaga a través de un tubo lleno de gas. La fuente de la onda es un pistón en oscilación a la izquierda.

A medida que el pistón tiene una oscilación sinusoidal, se establecen continuamente regiones de compresión y enrarecimiento. La distancia entre dos compresiones sucesivas (o dos enrarecimientos sucesivos) iguala la longitud de onda λ de la onda sonora. Mientras estas regiones viajan a través del tubo, cualquier elemento pequeño del medio se mueve con movimiento armónico simple paralelo a la dirección de la onda. Si $s(x, t)$ es la posición de un elemento pequeño en relación con su posición de equilibrio,[1] se puede expresar esta función de posición armónica como

$$s(x, t) = s_{\text{máx}} \cos (kx - \omega t) \tag{17.2}$$

donde $s_{\text{máx}}$ es la posición máxima del elemento relativo al equilibrio. Con frecuencia, este parámetro se llama **amplitud de desplazamiento** de la onda. El parámetro k es el número de onda, y ω es la frecuencia angular de la onda. Advierta que el desplazamiento del elemento es a lo largo de x, en la dirección de propagación de la onda sonora, lo que significa que se trata de una onda longitudinal.

La variación en la presión del gas ΔP observada desde el valor de equilibrio también es periódica. Para la función de posición en la ecuación 17.2, ΔP se conoce por

$$\Delta P = \Delta P_{\text{máx}} \operatorname{sen} (kx - \omega t) \tag{17.3}$$

donde **la amplitud de presión $\Delta P_{\text{máx}}$**, que es el cambio máximo en presión desde el valor de equilibrio, se proporciona por

$$\Delta P_{\text{máx}} = \rho v \omega s_{\text{máx}} \tag{17.4}$$

La ecuación 17.3 se deduce en el ejemplo 17.1.

[1] En este caso se usa $s(x, t)$ en lugar de $y(x, t)$ porque el desplazamiento de los elementos del medio no es perpendicular a la dirección x.

EJEMPLO 17.1 Deducción de la ecuación 17.3

Obtener la expresión para la variación de presión en una onda sonora conocida por la ecuación 17.3.

SOLUCIÓN

Analizar El elemento de gas tiene un grosor Δx en la dirección horizontal y un área de sección transversal A, de modo que su volumen es $V_i = A\,\Delta x$. Cuando una onda sonora desplaza el elemento, las dos caras planas del disco se mueven a través de diferentes distancias s. El cambio en volumen ΔV del elemento cuando una onda sonora desplaza al elemento es igual a $A\,\Delta s$, donde Δs es la diferencia entre los valores de s entre las dos caras planas del disco.

A partir de la definición de módulo volumétrico (véase la ecuación 12.8), exprese la variación de presión en el elemento de gas como una función de su cambio de volumen:

$$\Delta P = -B\frac{\Delta V}{V_i}$$

Sustituya para el volumen inicial y el cambio en volumen del elemento:

$$\Delta P = -B\frac{A\,\Delta s}{A\,\Delta x} = -B\frac{\Delta s}{\Delta x}$$

Permita que el grosor Δx del disco se aproxime a cero de modo que la relación $\Delta s/\Delta x$ se convierta en una derivada parcial:

$$\Delta P = -B\frac{\partial s}{\partial x}$$

Sustituya la función de posición conocida por la ecuación 17.2:

$$\Delta P = -B\frac{\partial}{\partial x}[s_{\text{máx}}\cos(kx - \omega t)] = Bs_{\text{máx}}k\,\text{sen}\,(kx - \omega t)$$

Use la ecuación 17.1 para expresar el módulo volumétrico como $B = \rho v^2$ y sustituya:

$$\Delta P = \rho v^2 s_{\text{máx}} k\,\text{sen}\,(kx - \omega t)$$

Aplique la ecuación 16.11 en la forma $k = \omega/v$ y sustituya:

$$\Delta P = \rho v \omega s_{\text{máx}}\,\text{sen}\,(kx - \omega t)$$

Ya que la función seno tiene un valor máximo de 1, identifique el valor máximo de la variación de presión como $\Delta P_{\text{máx}} = \rho v \omega s_{\text{máx}}$ (véase la ecuación 17.4) y sustituya para esta combinación en la expresión previa:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{máx}}\,\text{sen}\,(kx - \omega t)$$

Intensidad de ondas sonoras periódicas

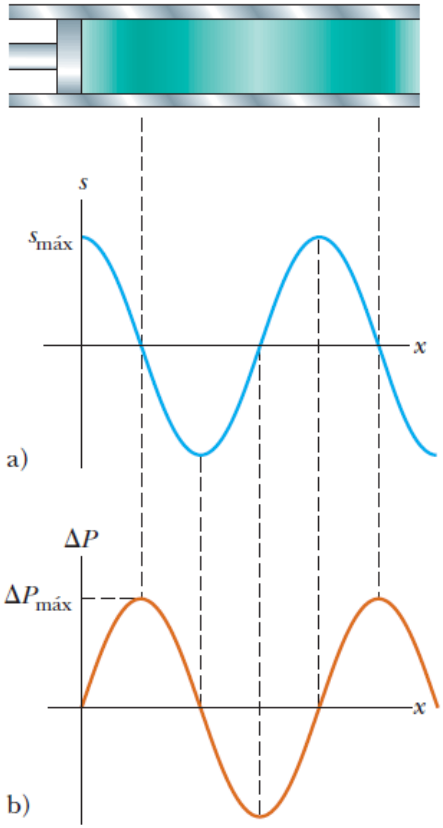


Figura 17.3 a) Amplitud de desplazamiento y b) amplitud de presión en función de la posición para una onda longitudinal sinusoidal.

En el capítulo 16 se demostró que una onda que viaja sobre una cuerda tensa transporta energía. Se aplica el mismo concepto a ondas sonoras. Considere un elemento de aire de masa Δm y longitud Δx enfrente de un pistón de área A que oscila con una frecuencia ω, como se muestra en la figura 17.4. El pistón transmite energía a este elemento de aire en el tubo y la energía se propaga alejándose del pistón mediante la onda sonora. Para evaluar la rapidez de transferencia de energía en la onda sonora, evalúe la energía cinética de este elemento de aire, que se somete a movimiento armónico simple. Un procedimiento similar al de la sección 16.5, donde se evaluó la rapidez de transferencia de energía para una onda sobre una cuerda, muestra que la energía cinética en una longitud de onda de la onda sonora es

$$K_\lambda = \tfrac{1}{4}(\rho A)\omega^2 s_{máx}^2 \lambda$$

Como en el caso de la onda en una cuerda de la sección 16.5, la energía potencial total para una longitud de onda tiene el mismo valor que la energía cinética total; por lo tanto, la energía mecánica total para una longitud de onda es

$$E_\lambda = K_\lambda + U_\lambda = \tfrac{1}{2}(\rho A)\omega^2 s_{máx}^2 \lambda$$

A medida que la onda sonora se mueve a través del aire, esta cantidad de energía pasa por un punto determinado durante un periodo de oscilación. Por tanto, la rapidez de transferencia de energía es

$$\mathcal{P} = \frac{E_\lambda}{T} = \frac{\tfrac{1}{2}(\rho A)\omega^2 s_{máx}^2 \lambda}{T} = \tfrac{1}{2}(\rho A)\omega^2 s_{máx}^2 \left(\frac{\lambda}{T}\right) = \tfrac{1}{2}\rho A v \omega^2 s_{máx}^2$$

donde v es la rapidez del sonido en el aire. Compare esta expresión con la ecuación 16.21 para una onda sobre una cuerda.

Intensidad de ondas sonoras periódicas

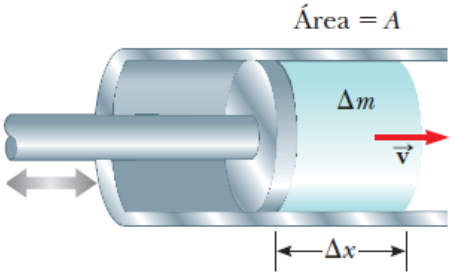


Figura 17.4 Un pistón en oscilación transfiere energía al aire en el tubo, por lo que el elemento de aire de longitud Δx y masa Δm oscila con una amplitud $s_{máx}$.

La **intensidad** I de una onda, o la potencia por cada unidad de área, se define como la rapidez a la cual la energía transportada por la onda se transfiere a través de una unidad de área A perpendicular a la dirección de viaje de la onda:

$$I \equiv \frac{\mathcal{P}}{A} \tag{17.5}$$

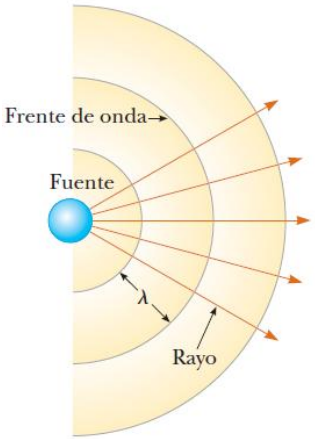
En este caso, la intensidad es, debido a eso,

Intensidad de una onda sonora ▶

$$I = \tfrac{1}{2}\rho v(\omega s_{máx})^2$$

En consecuencia, la intensidad de una onda sonora periódica es proporcional al cuadrado de la amplitud de desplazamiento y al cuadrado de la frecuencia angular. Esta expresión también se puede escribir en términos de la amplitud de presión $\Delta P_{máx}$; en este caso, se usa la ecuación 17.4 para obtener

$$I = \frac{(\Delta P_{máx})^2}{2\rho v} \tag{17.6}$$



La potencia promedio $\mathcal{P}_{prom}$ emitida por la fuente debe tener una distribución uniforme sobre cada frente de onda esférica de área $4\pi r^2$. Por tanto, la intensidad de la onda a una distancia r de la fuente es

$$I = \frac{\mathcal{P}_{prom}}{A} = \frac{\mathcal{P}_{prom}}{4\pi r^2} \tag{17.7}$$

Pregunta rápida 17.2 Una cuerda de guitarra que vibra hace muy poco sonido si no está montada en el cuerpo de una guitarra. ¿Por qué el sonido tiene mayor intensidad si la cuerda se une al cuerpo de la guitarra? a) La cuerda vibra con más energía. b) La energía deja la guitarra a mayor rapidez. c) La potencia del sonido se dispersa sobre un área más grande en la posición del escucha. d) La potencia del sonido se concentra en un área más pequeña en la posición del escucha. e) La rapidez del sonido es mayor en el material del cuerpo de la guitarra. f) Ninguna de estas respuestas es correcta.

EJEMPLO 17.2 Límites auditivos

Los sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una frecuencia de 1 000 Hz corresponden a una intensidad de aproximadamente $1.00 \times 10^{-12}\ \text{W/m}^2$, que se llama *umbral de audición*. Los sonidos más fuertes que el oído tolera a esta frecuencia corresponden a una intensidad de aproximadamente $1.00\ \text{W/m}^2$, el *umbral de dolor*. Determine la amplitud de presión y la amplitud de desplazamiento asociadas con estos dos límites.

SOLUCIÓN

Analizar Para hallar la amplitud de presión en el umbral de audición, use la ecuación 17.6 y considere que la rapidez de las ondas sonoras en el aire es $v = 343\ \text{m/s}$ y la densidad del aire es $\rho = 1.20\ \text{kg/m}^3$:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{máx}} &= \sqrt{2\rho v I} \\ &= \sqrt{2(1.20\ \text{kg/m}^3)(343\ \text{m/s})(1.00 \times 10^{-12}\ \text{W/m}^2)} \\ &= 2.87 \times 10^{-5}\ \text{N/m}^2\end{aligned}$$

Calcule la correspondiente amplitud de desplazamiento con la ecuación 17.4, y recuerde que $\omega = 2\pi f$ (ecuación 16.9):

$$\begin{aligned}s_{\text{máx}} &= \frac{\Delta P_{\text{máx}}}{\rho v \omega} = \frac{2.87 \times 10^{-5}\ \text{N/m}^2}{(1.20\ \text{kg/m}^3)(343\ \text{m/s})(2\pi \times 1\,000\ \text{Hz})} \\ &= 1.11 \times 10^{-11}\ \text{m}\end{aligned}$$

De manera similar, uno encuentra que los sonidos más fuertes que puede tolerar el oído humano corresponden a una amplitud de presión de $28.7\ \text{N/m}^2$ y una amplitud de desplazamiento igual a $1.11 \times 10^{-5}\ \text{m}$.

Finalizar Ya que la presión atmosférica es casi $10^5\ \text{N/m}^2$, ¡el resultado para la amplitud de presión dice que el oído es sensible a fluctuaciones de presión tan pequeñas como 3 partes en 10^{10}! ¡La amplitud de desplazamiento también es un número notablemente pequeño! Si este resultado para $s_{\text{máx}}$ se compara con el tamaño de un átomo (aproximadamente $10^{-10}\ \text{m}$), se ve que el oído es un detector extremadamente sensible de ondas sonoras.

EJEMPLO 17.3 Variaciones de intensidad de una fuente puntual

Una fuente puntual emite ondas sonoras con una salida de potencia promedio de 80.0 W.

A) Encuentre la intensidad a 3.00 m de la fuente.

B) Hallar la distancia a la cual la intensidad del sonido es $1.00 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2}$.

SOLUCIÓN

A)

Ya que una fuente puntual emite energía en la forma de ondas esféricas, use la ecuación 17.7 para encontrar la intensidad:

$$I = \frac{\mathcal{P}_{\text{prom}}}{4\pi r^2} = \frac{80.0\ \text{W}}{4\pi(3.00\ \text{m})^2} = 0.707\ \text{W/m}^2$$

Esta intensidad es cercana al umbral del dolor.

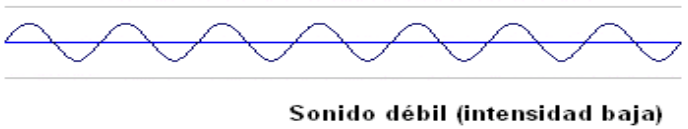
B)

Resuelva para r en la ecuación 17.7 y use el valor conocido para I:

$$r = \sqrt{\frac{\mathcal{P}_{\text{prom}}}{4\pi I}} = \sqrt{\frac{80.0\ \text{W}}{4\pi(1.00 \times 10^{-8}\ \text{W/m}^2)}}$$

$$= 2.52 \times 10^{4}\ \text{m}$$

Sonido fuerte (intensidad alta)



Sonido débil (intensidad baja)

Nivel sonoro en decibeles

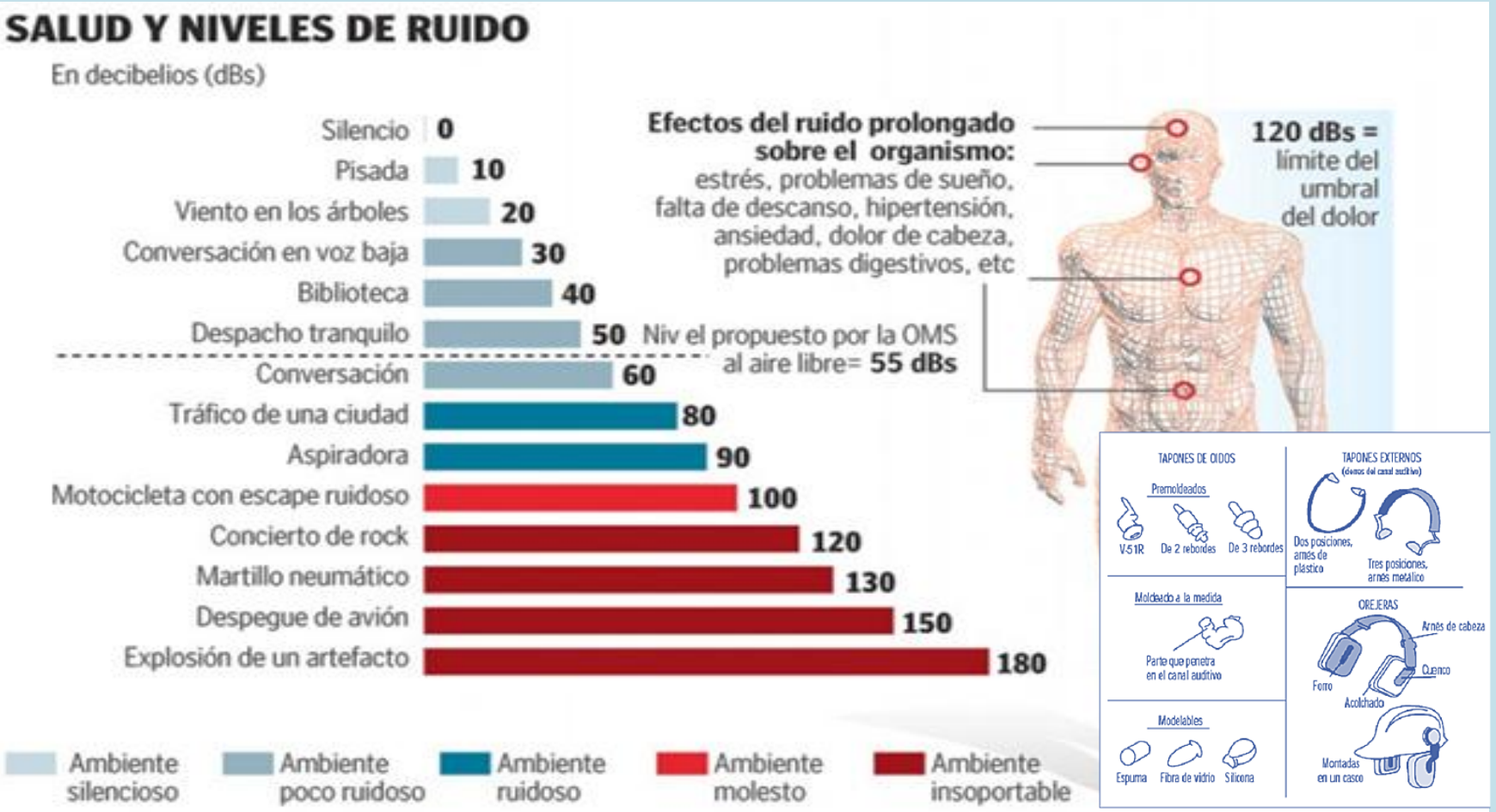
El ejemplo 17.2 ilustra el amplio intervalo de intensidades que puede detectar el oído humano. Ya que este intervalo es tan amplio, es conveniente usar una escala logarítmica, donde el **nivel sonoro** β (letra griega beta) se define mediante la ecuación

Nivel sonoro en decibeles ▶

$$\beta \equiv 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

La constante I_0 es la *intensidad de referencia*, considerada como el umbral de audición ($I_0 = 1.00 \times 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$) e I es la intensidad en watts por cada metro cuadrado a la que corresponde el nivel de sonido β, donde β se mide en **decibeles** (dB). En esta escala, el umbral de dolor ($I = 1.00\ \mathrm{W/m^2}$) corresponde a un nivel sonoro de $\beta = 10 \log [(1\ \mathrm{W/m^2})/(10^{-12}\ \mathrm{W/m^2})] = 10 \log (10^{12}) = 120$ dB, y el umbral de audición corresponde a $\beta = 10 \log [(10^{-12}\ \mathrm{W/m^2})/(10^{-12}\ \mathrm{W/m^2})] = 0$ dB.

La unidad *bel* recibe su nombre por el inventor del teléfono, Alexander Graham Bell (1847–1922). El prefijo *deci–* es el prefijo del SI que representa 10^{-1}.



La exposición prolongada a niveles sonoros altos puede dañar seriamente el oído humano. Siempre que los niveles sonoros superen los 90 dB, se recomienda el uso de tapones de oídos. Evidencia reciente sugiere que la "contaminación acústica" puede ser un factor que contribuye a la presión arterial alta, ansiedad y nerviosismo. La tabla 17.2 presenta algunos niveles sonoros representativos.

EJEMPLO 17.4 Niveles sonoros

Dos máquinas idénticas se colocan a la misma distancia de un trabajador. La intensidad del sonido entregado por cada máquina en funcionamiento en la posición del trabajador es de $2.0 \times 10^{-7}\ \mathrm{W/m^2}$.

A) Hallar el nivel sonoro que escucha el trabajador cuando una máquina está en funcionamiento.

B) Hallar el nivel sonoro que escucha el trabajador cuando dos máquinas están en funcionamiento:

SOLUCIÓN

A)

Analizar Aplique la ecuación 17.8 para calcular el nivel sonoro en la posición del trabajador con una máquina en funcionamiento:

$$\beta_1 = 10 \log \left(\frac{2.0 \times 10^{-7}\ \mathrm{W/m^2}}{1.00 \times 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}} \right) = 10 \log (2.0 \times 10^5) = 53\ \mathrm{dB}$$

B)

Aplique la ecuación 17.8 para calcular el nivel sonoro en la posición del trabajador, con el doble de intensidad:

$$\beta_2 = 10 \log \left(\frac{4.0 \times 10^{-7}\ \mathrm{W/m^2}}{1.00 \times 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}} \right) = 10 \log (4.0 \times 10^5) = 56\ \mathrm{dB}$$

Sonoridad y frecuencia

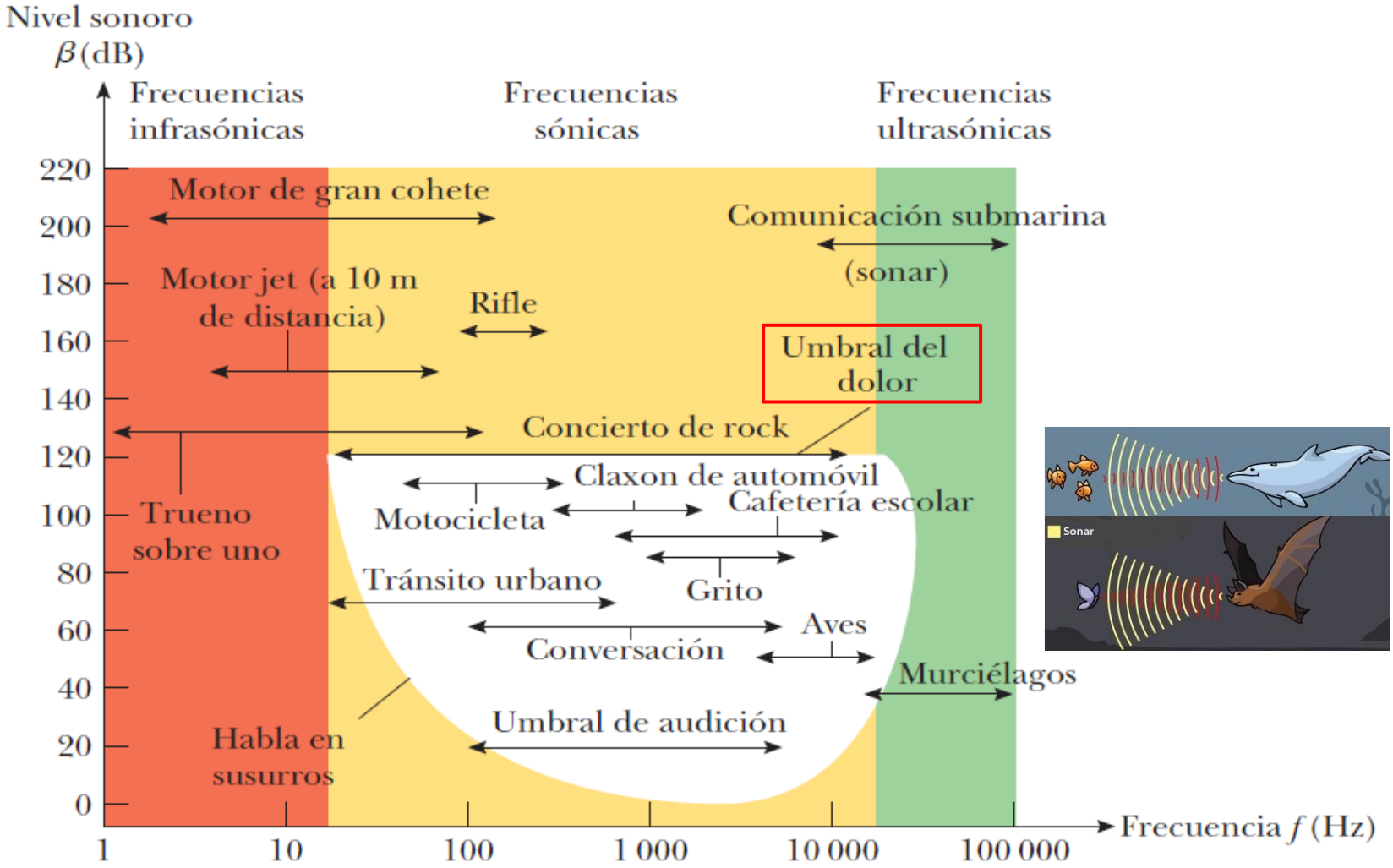


Figura 17.6 Intervalos aproximados de frecuencia y nivel sonoro de varias fuentes y la audición humana normal, que se muestra por el área blanca.

El efecto Doppler

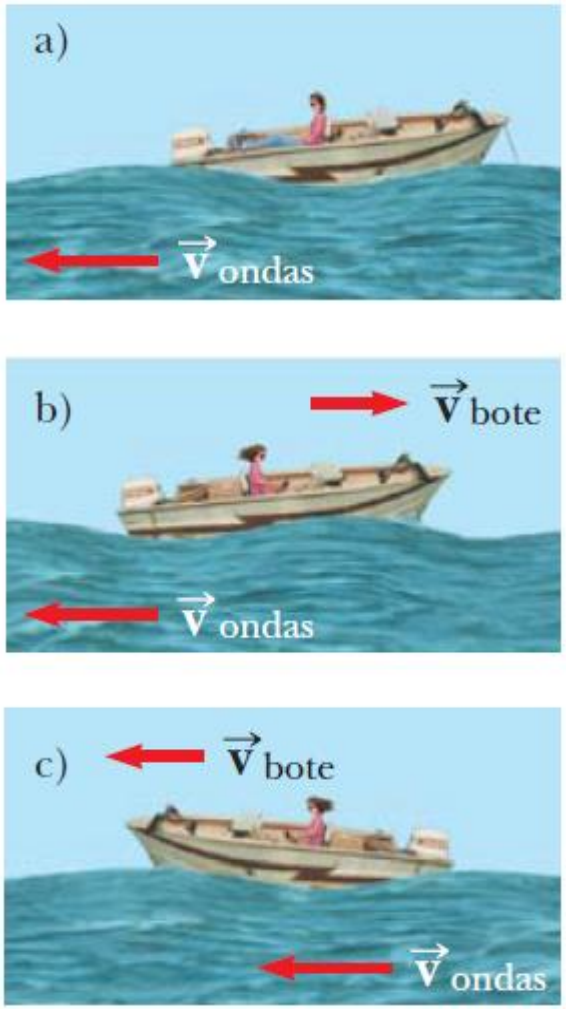
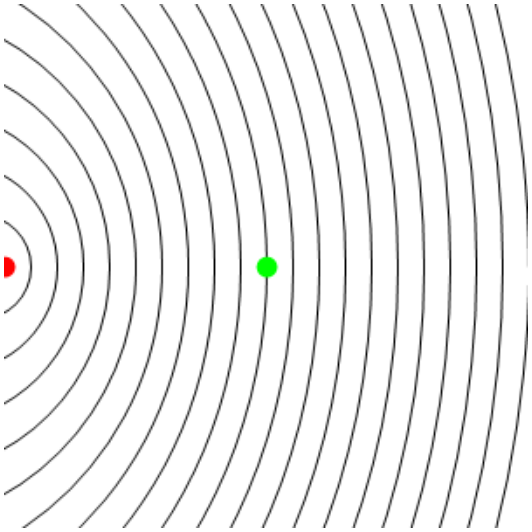


Figura 17.7 a) Ondas que se mueven hacia un bote estable. Las ondas viajan hacia la izquierda y su fuente está lejos hacia la derecha del bote, fuera del marco de la fotografía. b) El bote se mueve hacia la fuente de ondas. c) El bote se mueve alejándose de la fuente de ondas.



Christian Andreas Doppler

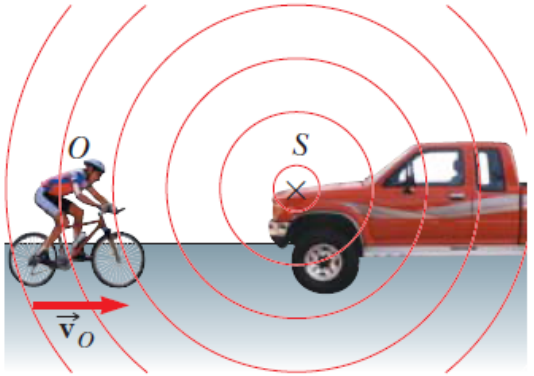


Figura 17.8 Un observador O (el ciclista) se mueve con una rapidez v_0 hacia una fuente puntual estable S, el claxon de una camioneta estacionada. El observador escucha una frecuencia f' mayor que la frecuencia de la fuente.

Llamado en honor del físico austriaco Christian Johann Doppler (1803–1853), quien predijo en 1842 el efecto tanto para ondas sonoras como para ondas luminosas.

El efecto Doppler

Cuando el observador se mueve hacia la fuente, la rapidez de las ondas relativa al observador es $v' = v + v_O$, como en el caso del bote en la figura 17.7, pero la longitud de onda λ no cambia. Por tanto, al usar la ecuación 16.12, $v = \lambda f$, se puede decir que la frecuencia f' que escucha el observador está *aumentada* y se conoce por

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_O}{\lambda}$$

Ya que $\lambda = v/f$, f' se puede expresar como

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v}\right) f \quad \text{(observador en movimiento hacia la fuente)} \qquad \textbf{(17.9)}$$

Si el observador es móvil alejándose de la fuente, la rapidez de la onda relativa al observador es $v' = v - v_O$. En este caso la frecuencia escuchada por el observador queda *reducida* y se encuentra por

$$f' = \left(\frac{v - v_O}{v}\right) f \quad \text{(observador alejándose de la fuente)} \qquad \textbf{(17.10)}$$

El efecto Doppler

Ahora suponga que la fuente está en movimiento y que el observador queda en reposo. Si la fuente avanza directo hacia el observador A en la figura 17.9a, los frentes de onda escuchados por el observador están más juntos de lo que estarían si la fuente no se moviera. Como resultado, la longitud de onda λ' medida por el observador A es más corta que la longitud de onda λ de la fuente. Durante cada vibración, que dura un intervalo de tiempo T (el periodo), la fuente se mueve una distancia $v_S T = v_S/f$ y la longitud de onda se *acorta* en esta cantidad. Por lo tanto, la longitud de onda observada λ' es

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - \frac{v_S}{f}$$

Como $\lambda = v/f$, la frecuencia f' que escucha el observador A es

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - (v_S/f)} = \frac{v}{(v/f) - (v_S/f)}$$

$$f' = \left(\frac{v}{v - v_S}\right) f \quad \text{(fuente móvil hacia el observador)} \qquad \textbf{(17.11)}$$

Es decir: la frecuencia observada *aumenta* siempre que la fuente se mueva hacia el observador.

Cuando la fuente se aleja de un observador estacionario, como es el caso del observador B en la figura 17.9a, el observador mide una longitud de onda λ' que es *mayor* que λ y escucha una frecuencia *reducida*:

$$f' = \left(\frac{v}{v + v_S}\right) f \quad \text{(fuente que se aleja del observador)} \qquad \textbf{(17.12)}$$

El efecto Doppler

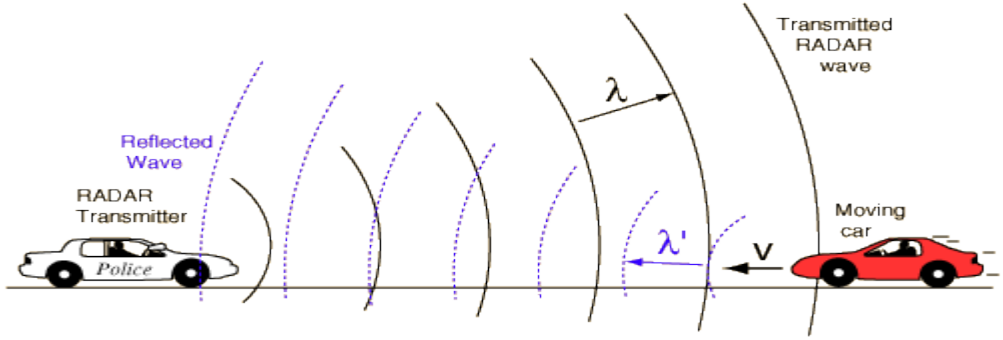
Por último, al combinar las ecuaciones 17.9 y 17.11 se obtiene la siguiente correspondencia general para la frecuencia observada:

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f$$

◀ Expresión general de corrimiento Doppler

En esta expresión los signos para los valores sustituidos para v_O y v_S dependen de la dirección de la velocidad. Un valor positivo se usa para movimiento del observador o la fuente *hacia* el otro (asociado con un *aumento* en la frecuencia observada), y un valor negativo se usa para movimiento de uno *alejándose* del otro (asociado con una *disminución* en la frecuencia observada).

Aunque el efecto Doppler se experimenta más comúnmente con ondas sonoras, es un fenómeno común a todas las ondas. Por ejemplo, el movimiento relativo de la fuente y el observador produce un corrimiento de frecuencia en las ondas luminosas. El efecto Doppler se usa en los sistemas de radar policiacos para medir la rapidez de los vehículos automotores. Del mismo modo, los astrónomos usan el efecto para determinar la rapidez de estrellas, galaxias y otros objetos celestes en relación con la Tierra.



EJEMPLO 17.5 El radio–reloj descompuesto

Su radio–reloj lo despierta con un sonido estable e irritante de 600 Hz de frecuencia. Una mañana funciona mal y no se puede apagar. Frustrado, arroja el radio–reloj por la ventana de su dormitorio en el cuarto piso, a 15.0 m del suelo. Suponga que la rapidez del sonido es de 343 m/s. Mientras escucha al radio–reloj que cae, ¿qué frecuencia escucha justo antes de que lo oiga chocar con el suelo?

SOLUCIÓN

Analizar Ya que el radio–reloj se modela como una partícula bajo aceleración constante debida a la gravedad, use la ecuación 2.13 para expresar la rapidez de la fuente de sonido:

$$v_S = v_{yi} + a_y t = 0 - gt = -gt$$

Aplique la ecuación 17.13 para determinar la frecuencia de corrimiento Doppler que se escucha del radio–reloj que cae:

$$1) \quad f' = \left[\frac{v + 0}{v - (-gt)}\right] f = \left(\frac{v}{v + gt}\right) f$$

A partir de la ecuación 2.61, hallar el tiempo en el que el reloj golpea el suelo:

$$y_f = y_i + v_{yi} t - \tfrac{1}{2} g t^2$$

$$-15.0 \text{ m} = 0 + 0 - \tfrac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2) t^2$$

$$t = 1.75 \text{ s}$$

De la ecuación 1), evalúe la frecuencia de corrimiento Doppler justo cuando el radio–reloj golpea el suelo:

$$f' = \left[\frac{343 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s} + (9.80 \text{ m/s}^2)(1.75 \text{ s})}\right](600 \text{ Hz})$$

$$= 571 \text{ Hz}$$

EJEMPLO

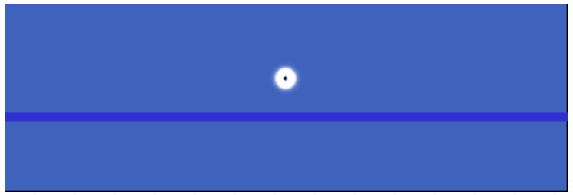
Una campana se toca en el aire emitiendo la nota La universal de 440 Hz. Un buzo se encuentra sumergido en agua a una profundidad de 10 metros. Calcular la frecuencia de la nota que escucha el buzo:

SOLUCIÓN

Suponiendo que el cambio de la velocidad del sonido en el agua con respecto del cambio de presión (dado el aumento de profundidad) sea pequeño, ya que el agua es un medio prácticamente incompresible, por lo que su densidad se mantiene casi constante con la profundidad y con ello las velocidades de desplazamiento molecular relacionadas con la propagación de ondas; entonces la frecuencia que escuchará el buzo será la misma que emitió la campana en el aire, de no ser así, existiría una discontinuidad.

Sin embargo, como la velocidad del sonido en el agua es diferente que en el aire la longitud de la onda si cambiará. Como $\lambda = v\,\nu$, $\Rightarrow \nu = \lambda/v$. Dado que las frecuencias dentro y fuera del agua son las mismas, la relación entre las longitudes de onda estará dada por la expresión:

$$\frac{\lambda_{aire}}{v_{aire}} = \frac{\lambda_{agua}}{v_{agua}}$$

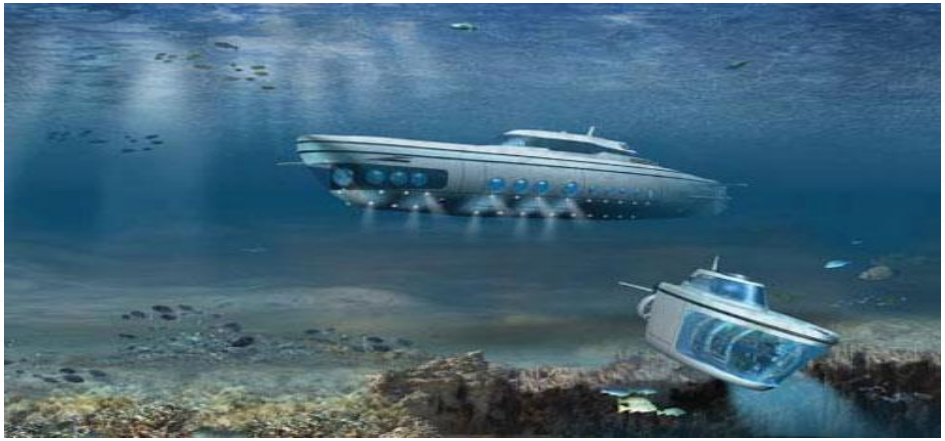


EJEMPLO 17.6 Submarinos Doppler

Un submarino (sub A) viaja a través de agua con una rapidez de 8.00 m/s y emite una onda de sonar con una frecuencia de 1 400 Hz. La rapidez del sonido en el agua es de 1 533 m/s. Un segundo submarino (sub B) se localiza de tal modo que ambos submarinos viajan directamente uno hacia el otro. El segundo submarino se mueve a 9.00 m/s.

A) ¿Qué frecuencia detecta un observador que viaja en el sub B mientras los submarinos se aproximan uno al otro?

B) Los submarinos apenas evitan el choque. ¿Qué frecuencia detecta un observador en el sub B mientras los submarinos se alejan uno del otro?



SOLUCIÓN

A)

Analizar Aplique la ecuación 17.13 para hallar la frecuencia de corrimiento Doppler que escucha el observador en el sub B y tenga cuidado con los signos de las velocidades de la fuente y el observador:

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f$$

$$f' = \left[\frac{1\,533 \text{ m/s} + (+9.00 \text{ m/s})}{1\,533 \text{ m/s} - (+8.00 \text{ m/s})}\right](1\,400 \text{ Hz}) = 1\,416 \text{ Hz}$$

B)

Use la ecuación 17.13 para hallar la frecuencia de corrimiento Doppler que escucha el observador en el sub B, y de nuevo tenga cuidado con los signos de las velocidades de la fuente y el observador:

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f$$

$$f' = \left[\frac{1\,533 \text{ m/s} + (-9.00 \text{ m/s})}{1\,533 \text{ m/s} - (-8.00 \text{ m/s})}\right](1\,400 \text{ Hz}) = 1\,385 \text{ Hz}$$

EJEMPLO

Una ambulancia detenida emite un tono de Sol con una frecuencia de 792 Hz. Calcular la frecuencia de los tonos que se escuchan cuando se acerca y cuando se aleja la ambulancia a una velocidad de 120 Km/h:

SOLUCIÓN

Cuando la fuente sonora está móvil hacia un observador estacionario, el efecto es un acortamiento de la longitud de onda, ya que la fuente está viajando tras las ondas que se aproximan, y por lo tanto, las crestas se juntan más entre si. Si la frecuencia de la fuente es ν y su velocidad es v_s, entonces en cada vibración viaja una distancia v_s/ν, y cada longitud de onda se acorta en esta cantidad. De aquí que la longitud de onda del sonido que llega al observador no sea $\lambda = v/\nu$ sino $\lambda' = v/\nu - v_s/\nu$. La frecuencia del sonido que el observador oye aumenta y está dada por:

$$\nu' = \frac{v}{\lambda'} = \nu \frac{v}{v - v_s}$$

En este caso, $\nu = 792$ Hz, la velocidad del sonido en el aire (a 20° C) es $v = 343$ m/s y la velocidad de la fuente es $v_s = 120$ Km/h = 33.333 m/s; así que:

$$\nu' = 792 \text{ Hz} \frac{343 \text{m/s}}{(343 \text{m/s}) - (33.33 \text{m/s})} = 877.25 \text{ Hz}$$

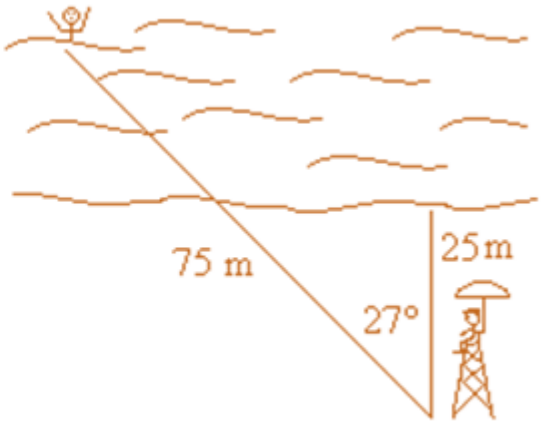
Si la fuente se mueve alejándose del observador, la longitud de onda emitida es v_s/ν mayor que λ, de modo que el observador oye una frecuencia disminuida, es decir:

$$\nu' = \nu \frac{v}{v + v_s}$$

Así que para este caso se tiene que: $\nu' = 792 \text{ Hz} \frac{343 \text{m/s}}{(343 \text{m/s}) + (33.33 \text{m/s})} = 721.849 \text{ Hz}$

EJEMPLO

Problema del salvavidas: un salvavidas se encuentra en la playa, sentado en su silla a una distancia de 25 m del mar. Repentinamente un turista da señales de ahogarse estando a una distancia de 75 m del salvavidas, que forma un ángulo de 27° con la línea que une la silla del salvavidas con el mar. El salvavidas debe correr un tramo de la distancia y nadar otro. El puede correr a 22 Km/h y nadar a 12 Km/h. Calcular la trayectoria que debe seguir para llegar cuanto antes al rescate: (Dar la respuesta en términos vectoriales).



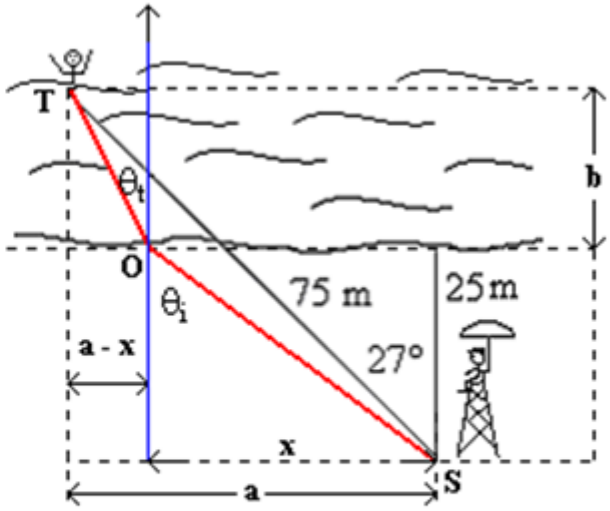
Nota: Fermat fue el primero en plantearse el problema del *tiempo mínimo de recorrido*, en relación a la propagación de la luz.

SOLUCIÓN

Para reducir al mínimo el tiempo de recorrido entre el punto S (salvavidas) y el punto T (turista en problemas), se utiliza como variable auxiliar a x. Es decir, cambiando x se mueve el punto O y se afecta por consiguiente la trayectoria de S a T. De este modo el tiempo de recorrido se podrá expresar como:

$$t = \frac{SO}{v_p} + \frac{OT}{v_m},$$

Donde SO es la magnitud del vector **SO**, que une al punto S con O y OT la magnitud del vector **OT** que une a los puntos O y T.



Las velocidades a las que se puede desplazar el salvavidas en la playa y en el mar son $v_p = 22$ Km/h y $v_m = 12$ Km/h respectivamente.

Con estos datos y tomando en cuenta el diagrama se puede escribir la fórmula para el tiempo de recorrido como:

$$t = \frac{\sqrt{(25\text{m})^2 + x^2}}{22\text{Km/h}} + \frac{\sqrt{b^2 + (a-x)^2}}{12\text{Km/h}}$$

Para minimizar t(x) con respecto a las variaciones en x, se establece que dt/dx = 0; es decir.

$$dt/dx = \frac{x}{(22\text{Km/h})\sqrt{(25\text{m})^2 + x^2}} + \frac{-(a-x)}{(12\text{Km/h})\sqrt{b^2 + (a-x)^2}} = 0$$

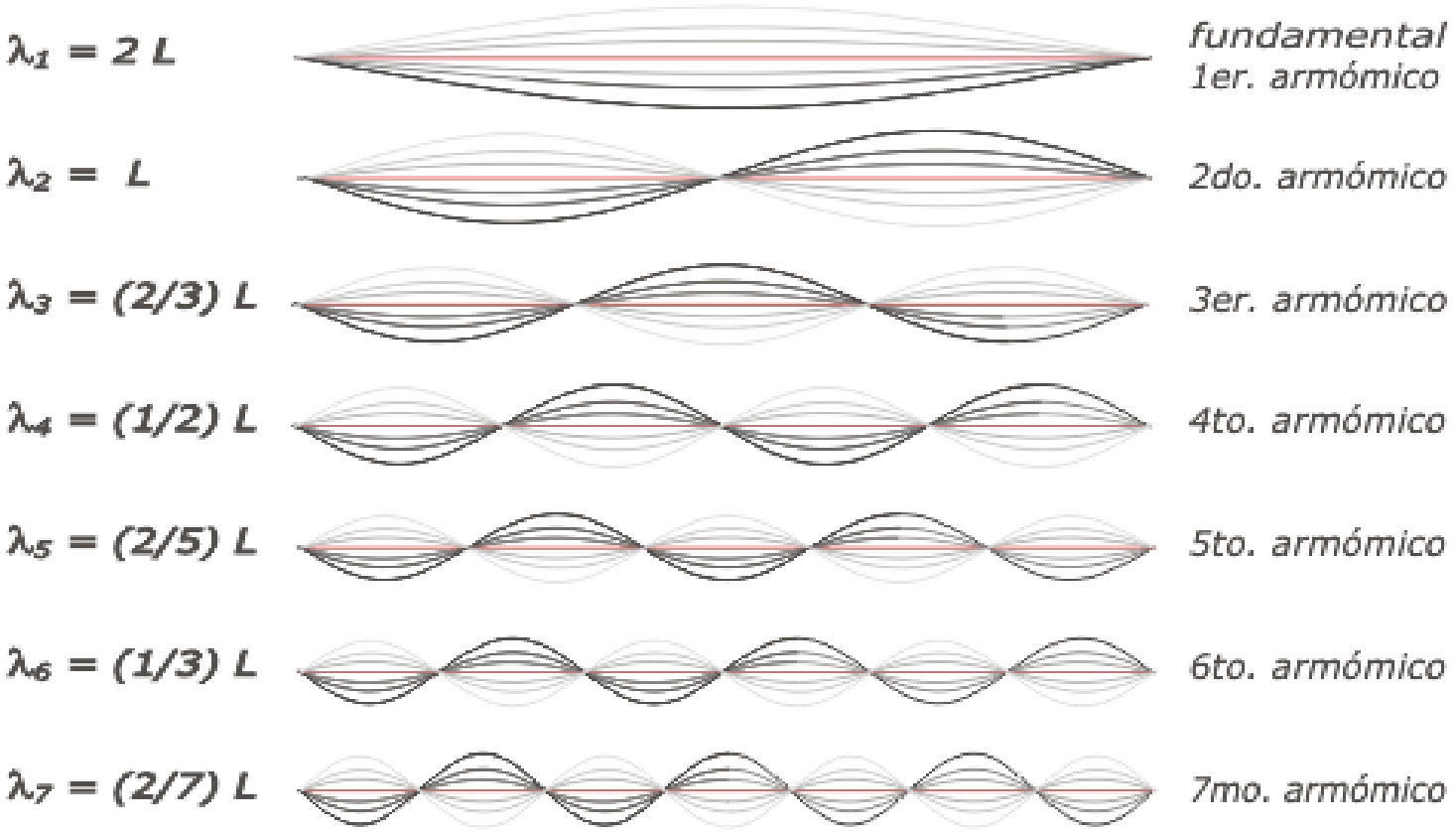
Despejando la x y sustituyendo el valor encontrado en la ecuación para t se encuentra el tiempo el valor del tiempo mínimo de este recorrido.

Usando el diagrama, se puede rescribir esta expresión como:

$$\frac{\text{Sen}\theta_i}{v_p} = \frac{\text{Sen}\theta_t}{v_m}$$

lo cual es nada más y nada menos, que la Ley de Snell.

Modos de Vibración



$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

◀ Longitudes de onda de modos normales

MODOS NORMALES DE UNA MEMBRANA CIRCULAR

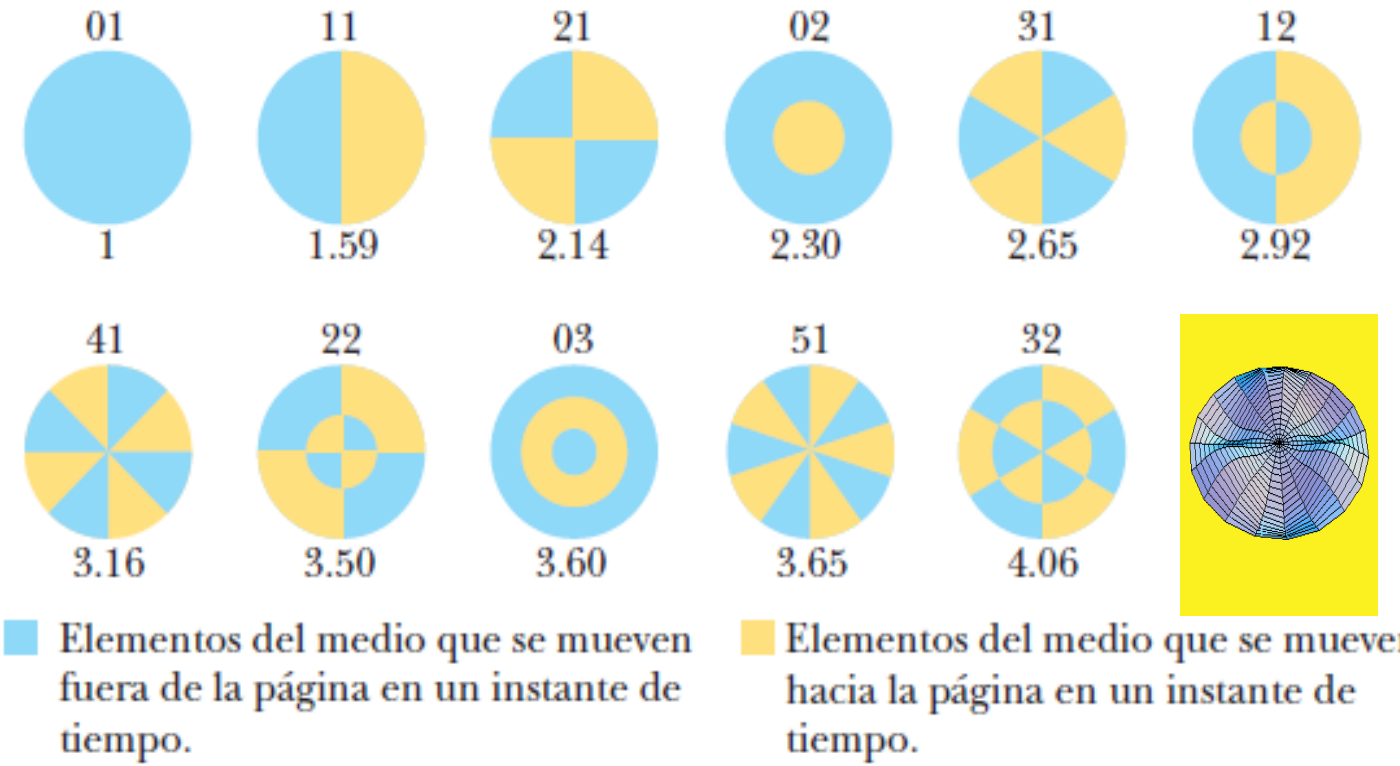
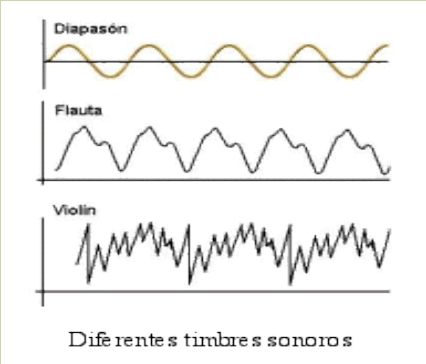


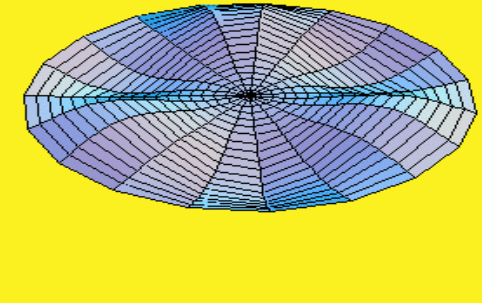
Figura 18.16 Representación de algunos de los posibles modos normales en una membrana circular fija en su perímetro. El par de números en cada patrón corresponde al número de nodos radiales y al número de nodos circulares, respectivamente.

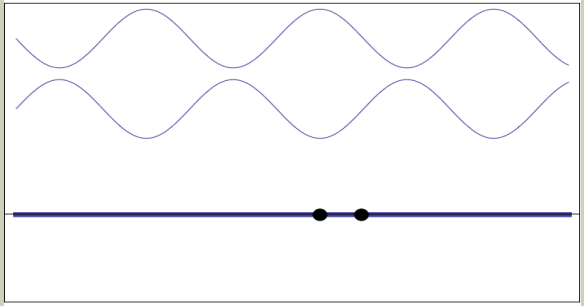
SUPERPOSICIÓN DE ONDAS

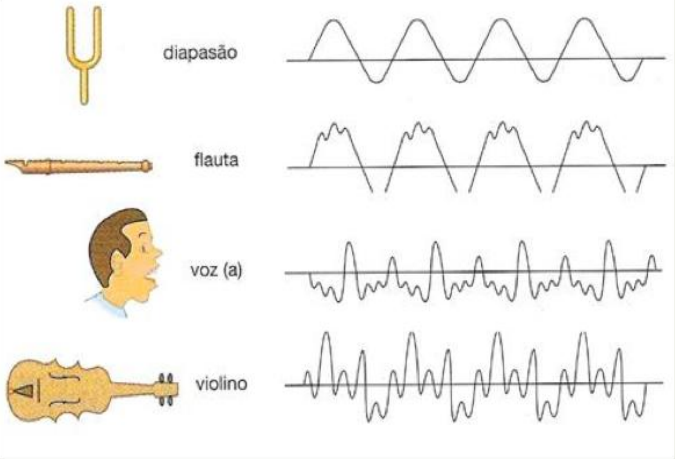
Si dos o más ondas progresivas se mueven a través de un medio, el valor resultante de la función de onda en cualquier punto es la suma algebraica de los valores de las funciones de onda de las ondas individuales.

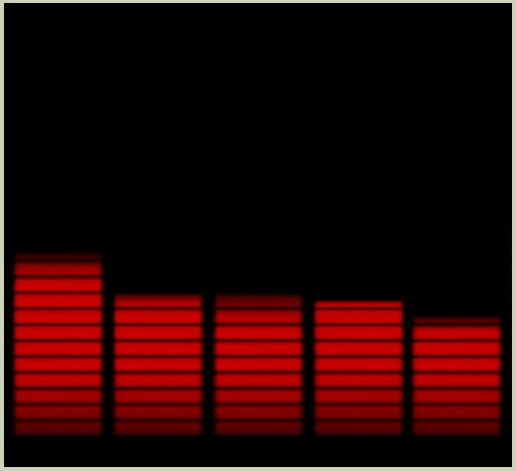


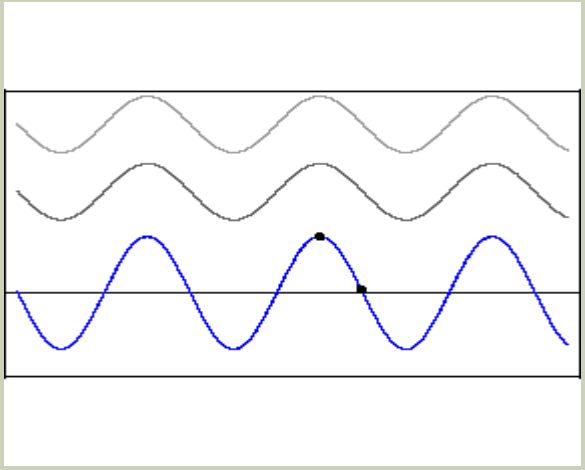
Diferentes timbres sonoros





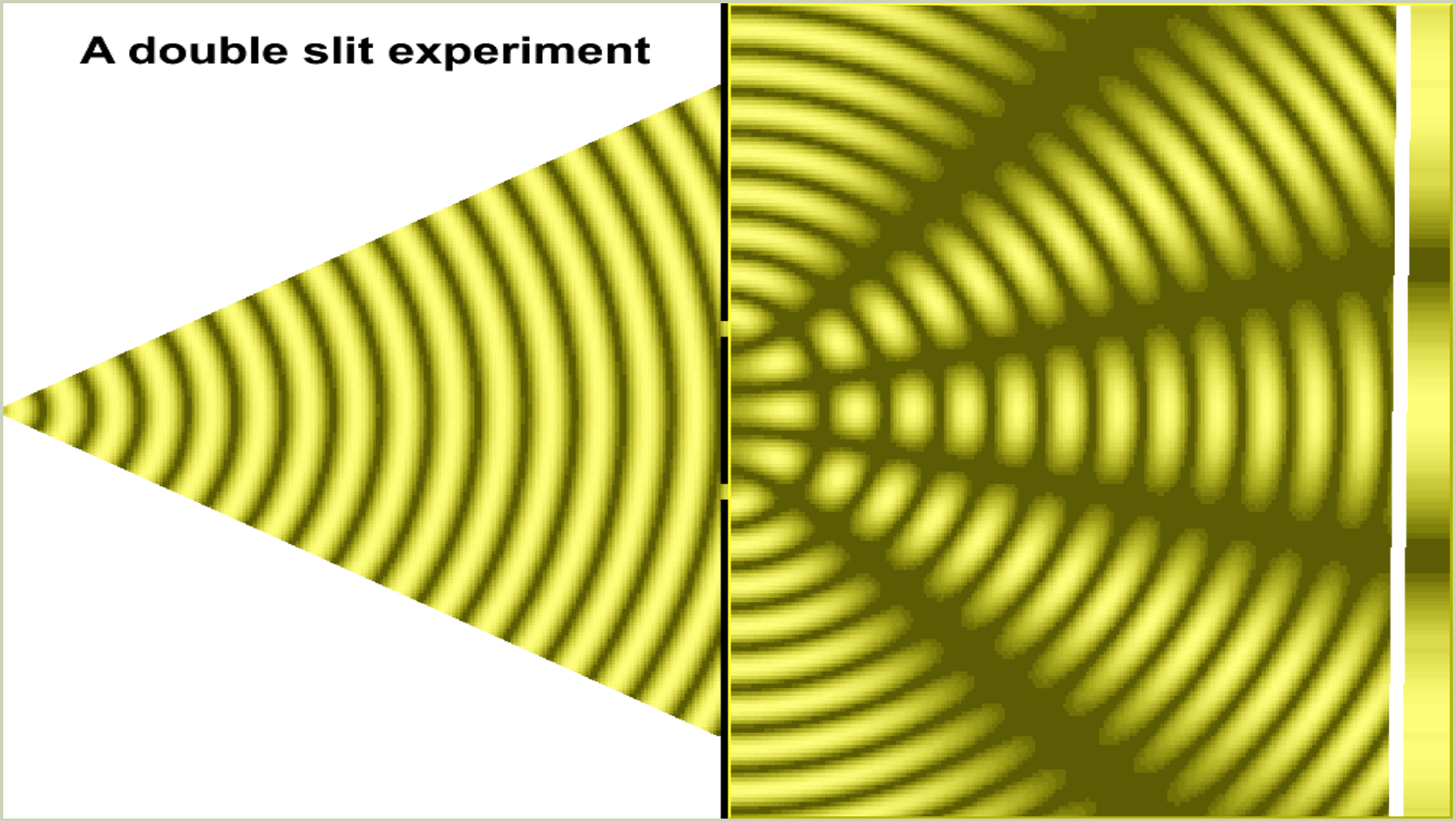




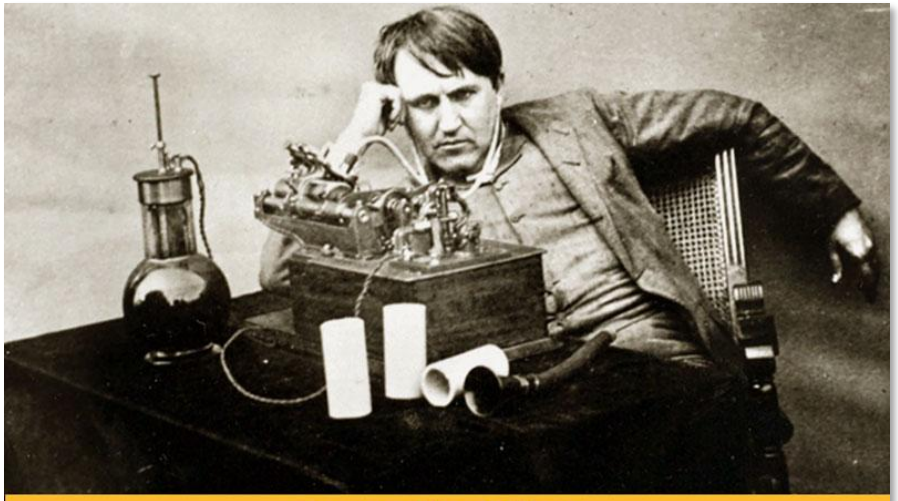


INTERFERENCIA

El experimente de la doble rendija



Grabación de sonido digital



Tomas Alba Edison

El primer dispositivo de grabación de sonido, el fonógrafo, lo inventó Thomas Edison en el siglo XIX. Las ondas sonoras se registraban en los primeros fonógrafos al codificar las formas de onda sonoras como variaciones en la profundidad de un surco continuo cortado en una delgada hoja enrollada alrededor de un cilindro. Durante la reproducción, a medida que una aguja seguía el surco del cilindro rotatorio, la aguja empujaba de atrás para adelante de acuerdo con las ondas sonoras codificadas en el disco. La aguja se unía a un diafragma y una bocina, lo que hacía al sonido lo suficientemente intenso para escucharse.

Grabación digital

En la grabación digital la información se convierte a código binario (unos y ceros), parecido a los puntos y rayas del código Morse.

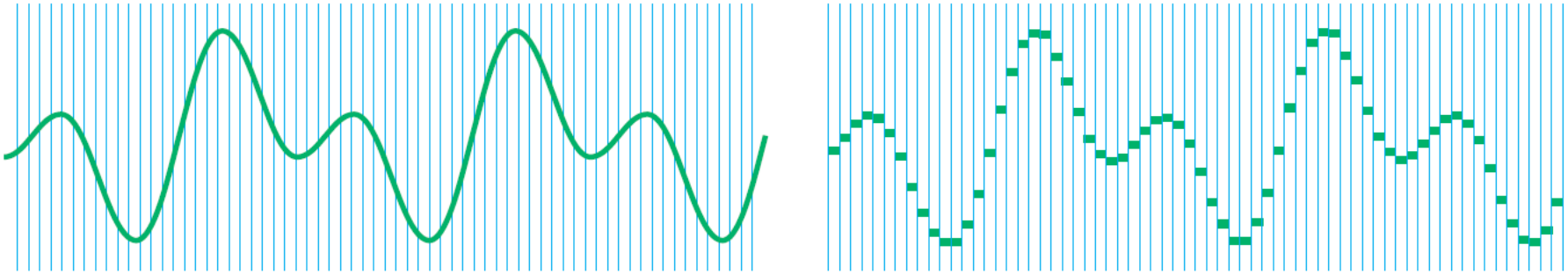


Figura 17.12 a) El sonido se digitaliza mediante el muestreo electrónico de la forma de onda sonora a intervalos periódicos. Durante cada intervalo de tiempo entre las líneas azules, se registra un número para el voltaje promedio durante el intervalo. La proporción de muestreo que se presenta aquí es mucho más lenta que la proporción de muestreo real de 44 100 muestras por segundo. b) Reconstrucción de la onda sonora muestreada en a). Advierta la reconstrucción escalonada en lugar de la forma de onda continua en a).

Números binarios de muestra

Número en base 10	Número en binario	Suma
1	0000000000000001	1
2	0000000000000010	2 + 0
3	0000000000000011	2 + 1
10	0000000000001010	8 + 0 + 2 + 0
37	0000000000100101	32 + 0 + 0 + 4 + 0 + 1
275	0000000100010011	256 + 0 + 0 + 0 + 16 + 0 + 0 + 2 + 1

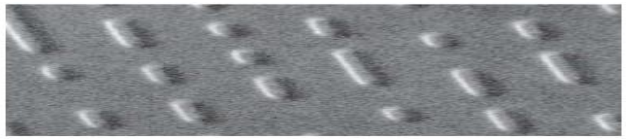


Figura 17.13 Superficie de un disco compacto que muestra las depresiones. Las transiciones entre depresiones y partes planas corresponden a unos binarios. Las regiones sin transiciones corresponden a ceros binarios.

Resumen

DEFINICIONES

La **intensidad** de una onda sonora periódica, que es la potencia por cada unidad de área, es

$$I \equiv \frac{\mathcal{P}}{A} = \frac{(\Delta P_{\text{máx}})^2}{2\rho v} \qquad \textbf{(17.5, 17.6)}$$

El **nivel sonoro** de una onda sonora en decibeles es

$$\beta \equiv 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \textbf{(17.8)}$$

La constante I_0 es una intensidad de referencia, que usualmente se considera como el umbral de audición ($1.00 \times 10^{-12}\ \text{W/m}^2$), e I es la intensidad de la onda sonora en watts por metro cuadrado.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

Las ondas sonoras son longitudinales y viajan a través de un medio comprimible con una rapidez que depende de las propiedades elásticas e inerciales de dicho medio. La rapidez del sonido en un líquido o gas que tenga un módulo volumétrico B y densidad ρ es

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad \textbf{(17.1)}$$

Para ondas sonoras sinusoidales, la variación en la posición de un elemento del medio es

$$s(x, t) = s_{\text{máx}} \cos\,(kx - \omega t) \qquad \textbf{(17.2)}$$

y la variación en presión a partir del valor de equilibrio es

$$\Delta P = \Delta P_{\text{máx}} \operatorname{sen}\,(kx - \omega t) \qquad \textbf{(17.3)}$$

donde $\Delta P_{\text{máx}}$ es la **amplitud de presión**. La onda de presión está 90° fuera de fase con la onda de desplazamiento. La correspondencia entre $s_{\text{máx}}$ y $\Delta P_{\text{máx}}$ es

$$\Delta P_{\text{máx}} = \rho v \omega s_{\text{máx}} \qquad \textbf{(17.4)}$$

El cambio en la frecuencia que escucha un observador siempre que hay movimiento relativo entre una fuente de ondas sonoras y el observador se llama **efecto Doppler**. La frecuencia observada es

$$f' = \left(\frac{v + v_O}{v - v_S}\right) f \qquad \textbf{(17.13)}$$

En esta expresión, los signos para los valores sustituidos para v_O y v_S dependen de la dirección de la velocidad. Un valor positivo para la velocidad del observador o fuente se sustituye si la velocidad de uno es hacia el otro, mientras que un valor negativo representa una velocidad de uno alejándose del otro.

En la grabación digital de sonido, la forma de onda sonora se muestrea 44 100 veces por segundo. La presión de la onda por cada muestreo se mide y convierte en número binario. En la reproducción estos números binarios se leen y usan para construir la forma de onda original.

Resumen

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

El **principio de sobreposición** especifica que, cuando dos o más ondas se mueven a través de un medio, el valor de la función de onda resultante es igual a la suma algebraica de los valores de las funciones de onda individuales.

El fenómeno de **batimiento** es la variación periódica en intensidad en un punto dado debido a la sobreposición de dos ondas que tienen frecuencias ligeramente diferentes.

Las **ondas estacionarias** se forman a partir de la combinación de dos ondas sinusoidales que tienen la misma frecuencia, amplitud y longitud de onda, pero que viajan en direcciones opuestas. La onda estacionaria resultante se describe mediante la función de onda

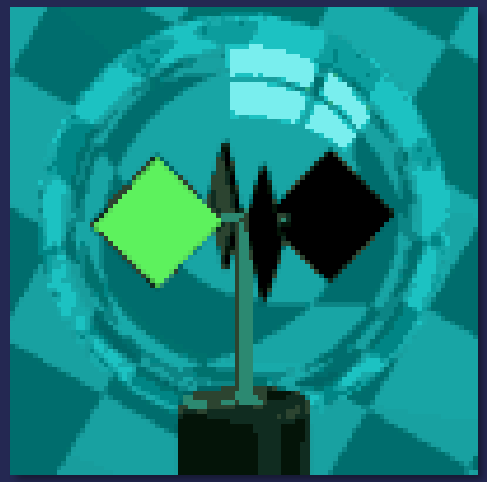
$$y = (2A \operatorname{sen} kx) \cos \omega t \tag{18.1}$$

Por tanto, la amplitud de la onda estacionaria es $2A$, y la amplitud del movimiento armónico simple de cualquier partícula del medio varía de acuerdo con su posición como $2A \operatorname{sen} kx$. Los puntos de amplitud cero (llamados **nodos**) ocurren en $x = n\lambda/2$ ($n = 0, 1, 2, 3,...$). Los puntos de amplitud máxima (llamados **antinodos**) ocurren en $x = n\lambda/4$ ($n = 1, 3, 5,...$). Los antinodos adyacentes están separados por una distancia $\lambda/2$. Los nodos adyacentes también están separados por una distancia $\lambda/2$.

FIN

FÍSICA BÁSICA

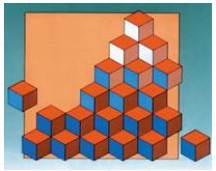
NATURALEZA DE LA LUZ Y LEYES DE ÓPTICA GEOMÉTRICA



POLIGONO EDICIONES

CLASE DE FÍSICA ILUSTRADA

Objetivos de la Lección



Al terminar esta lección el participante será capaz de:

- *Identificar los aspectos elementales de la Naturaleza de la Luz.*
- *Listar algunas de las teorías de la luz que han tenido relevancia histórica.*
- *Describir algunos métodos para medir la velocidad de la luz.*
- *Reconocer las características de los rayos de luz según la Óptica Geométrica.*
- *Describir las características geométricas de los fenómenos de reflexión y refracción de los rayos de luz al incidir y penetrar en diferentes materiales.*

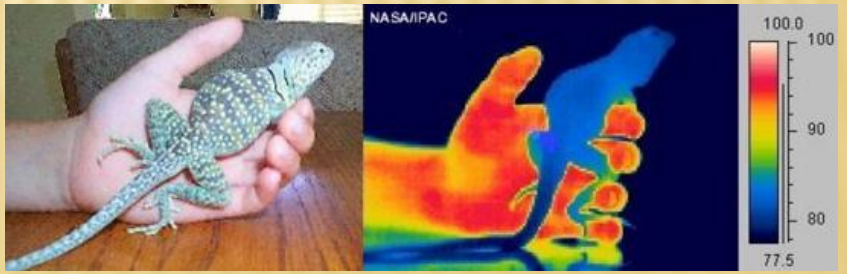
Luz y óptica

La luz es esencial para casi todo en la vida en la Tierra.

Por ejemplo, las plantas convierten la energía transferida por la luz solar en energía química.

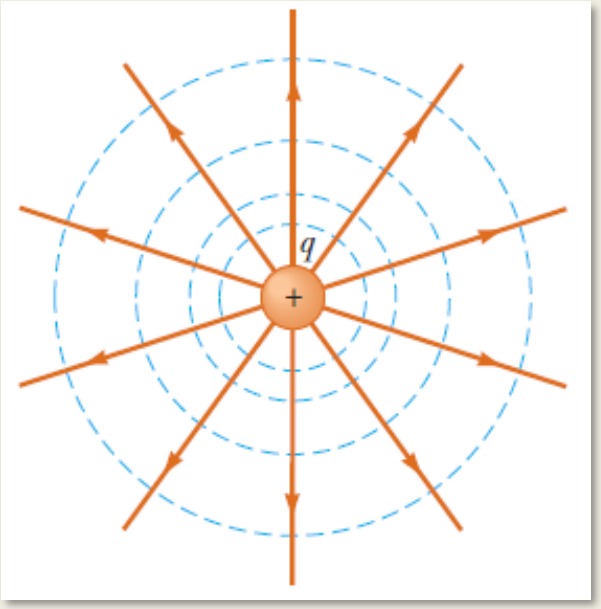
Además, la luz es el principal medio por el cual es posible transmitir y recibir información hacia y desde objetos situados en el entorno inmediato y en todo el Universo.

La luz es una forma de radiación electromagnética y representa transferencia de energía desde la fuente al observador.

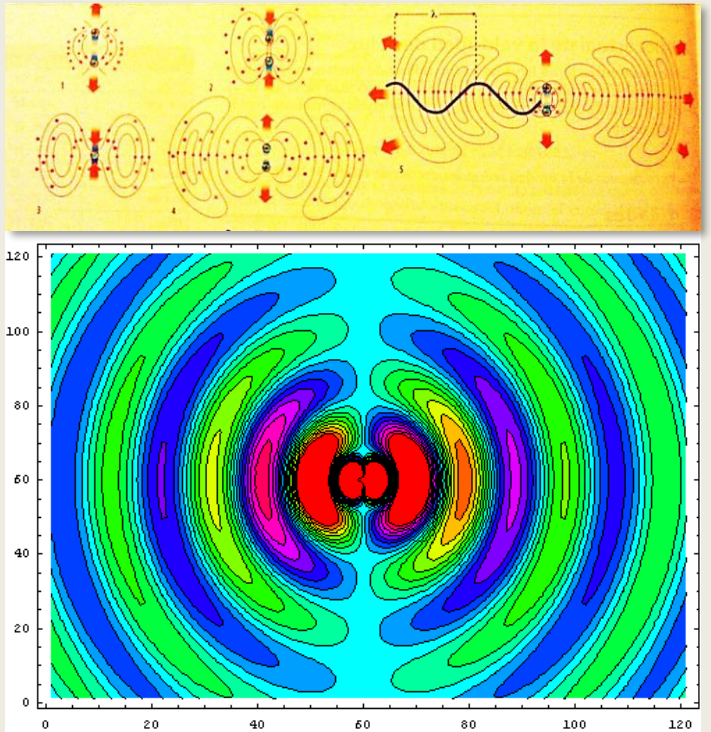


INTRODUCCIÓN: LA LUZ

Cuando una carga eléctrica oscila en el espacio y el tiempo su campo eléctrico genera una onda electromagnética.



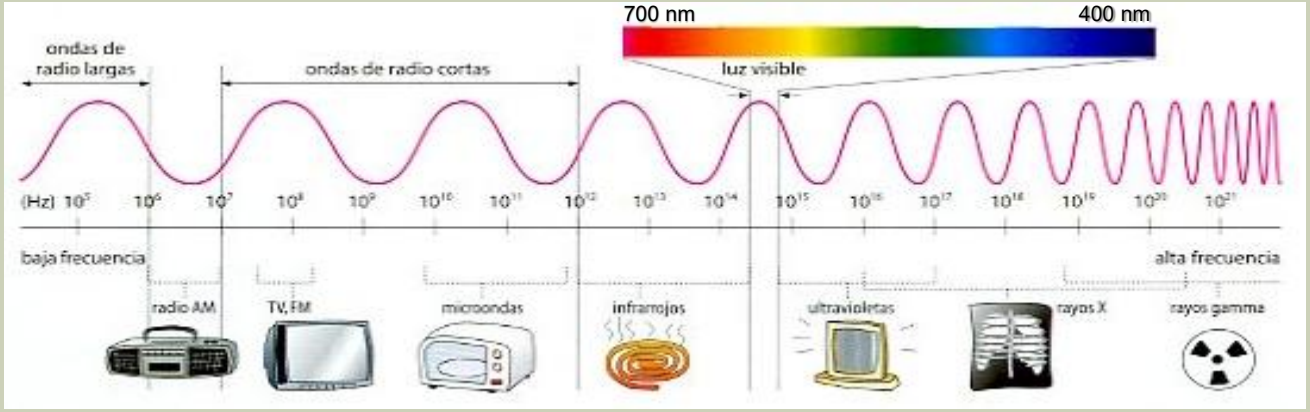
Una carga puntual

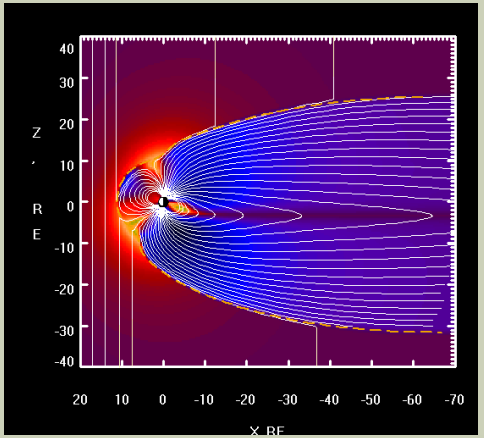


Oscilación del Campo Eléctrico

INTRODUCCIÓN: LA LUZ

Se llama *Luz* a la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano.





El Campo Magnético de la Tierra nos protege de la radiación solar.

En la Tierra la luz es esencial para la vida ya que las plantas convierten la energía que transporta en energía química vital.

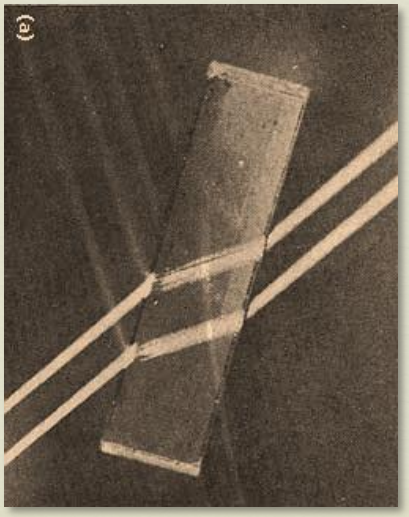
$$6CO_2 \text{ dióxido de carbono} + 6H_2O \text{ agua} \xrightarrow{\text{Luz}} C_6H_{12}O_6 \text{ azúcar} + 6O_2 \text{ oxígeno}$$

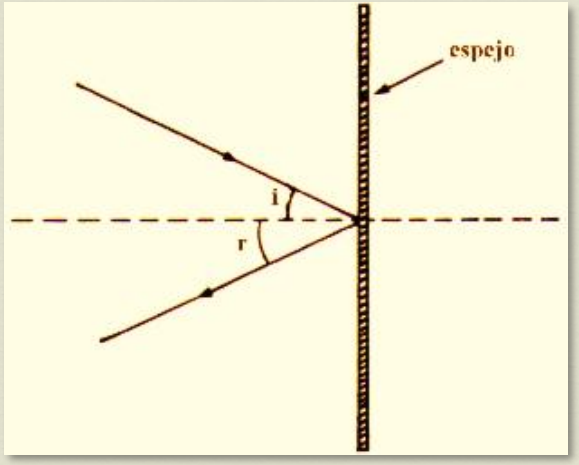
NOTAS HISTÓRICAS

CHRISTIAN HUYGENS
Físico y astrónomo holandés
(1629-1695)

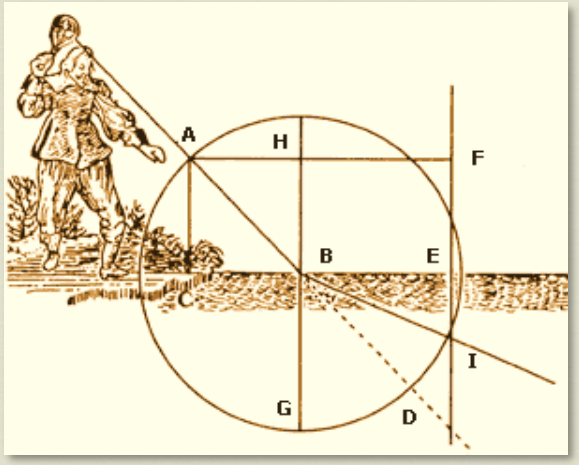
Para Huygens, la luz consistía en un tipo de movimiento vibratorio que se dispersa y produce la sensación de luz cuando incide en los ojos.

- ***La luz se desplaza en línea recta: "rayo luminoso".***
- ***Dedujo las leyes de la reflexión y la refracción (1678).***





Reflexión especular de un rayo de luz



Refracción de un rayo de luz

Medición de la velocidad de la luz

La luz se desplaza con una rapidez tan alta (a tres dígitos $c = 2.99 \times 10^8$ m/s) que los primeros intentos por medirla fracasaron.

Método de Ole Roemer (1675)

- La luna de Júpiter, Io, tiene un periodo de revolución alrededor del planeta de 42.5 hrs.
- El periodo de Júpiter alrededor del Sol es de 12 años.
- Cuando la tierra se desplaza 90° alrededor del Sol, Júpiter gira (1/12)90° = 7.5°
- Se observan periodos más largos cuando la Tierra se aleja de Júpiter y más cortos cuando se acerca.
- Calculando el cambio en la distancia de la Tierra a Júpiter y la diferencia en los periodos, logró concluir que la velocidad de la luz es $c = 2.3 \times 10^8$ m/s.

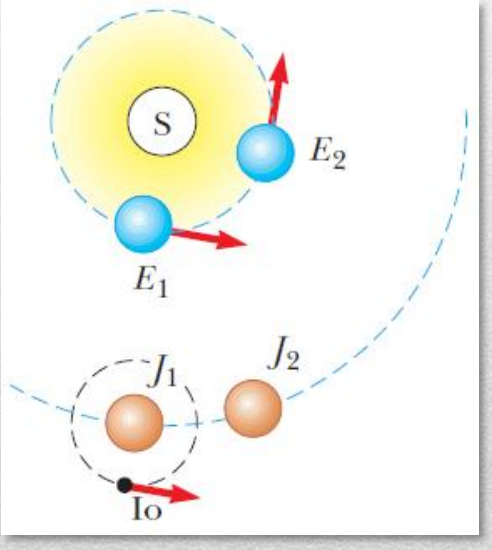
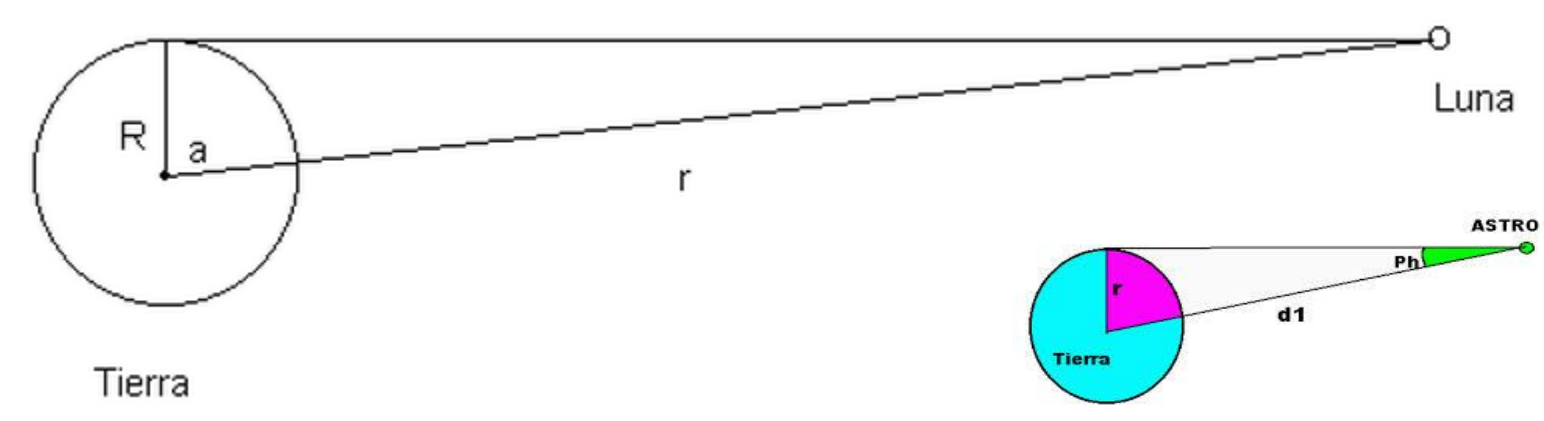


Diagrama planetario
(dibujo sin escala)

Cálculo de la distancia Tierra-Luna

Se tiene que averiguar en qué lugar de la Tierra la Luna está saliendo por el horizonte y en qué lugar se haya justo en el cenit. La situación queda representada en la figura:

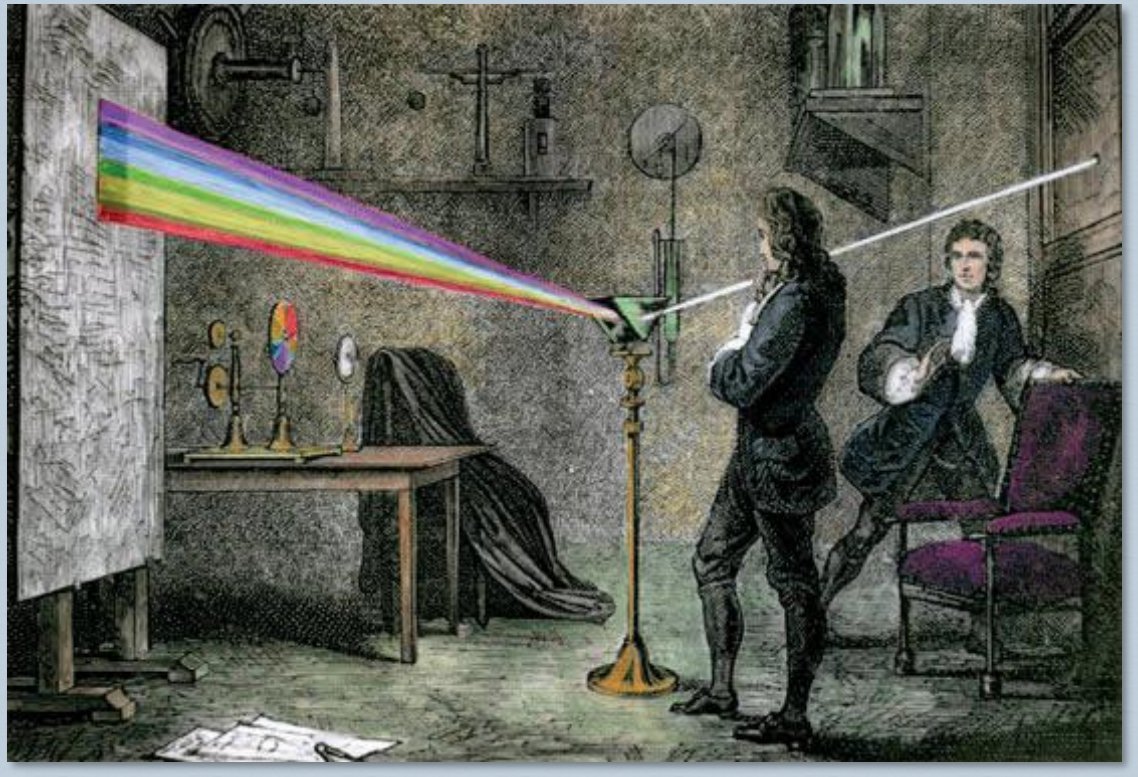


El triángulo formado por el centro de la Tierra, el lugar donde la Luna es vista en el horizonte y la propia Luna es rectángulo. Conocemos el radio de la Tierra y podemos estimar el ángulo *a* que es de 89.05º. Por simple trigonometría tenemos que:

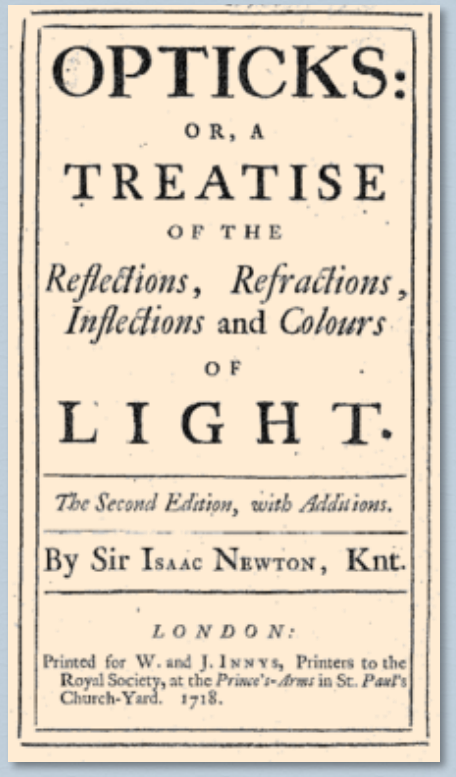
$$r = \frac{R}{Sen(90^\circ - a)} = \frac{6300km}{Sen(0.95^\circ)} = 380000km$$

NOTAS HISTÓRICAS

Newton propuso que la luz constaba de partículas emitidas por una fuente luminosa que estimulaban el sentido de la vista al entrar en los ojos del observador.



ISAAC NEWTON (1642-1727)
Realizando un experimento de dispersión usando un prisma.



OPTICKS:
OR, A
TREATISE
OF THE
Reflections, Refractions, Inflections and *Colours*
OF
LIGHT.

The Second Edition, with Additions.

By Sir Isaac Newton, Knt.

LONDON:
Printed for W. and J. Innys, Printers to the Royal Society, at the *Prince's-Arms* in St. *Paul's* Church-Yard. 1718.

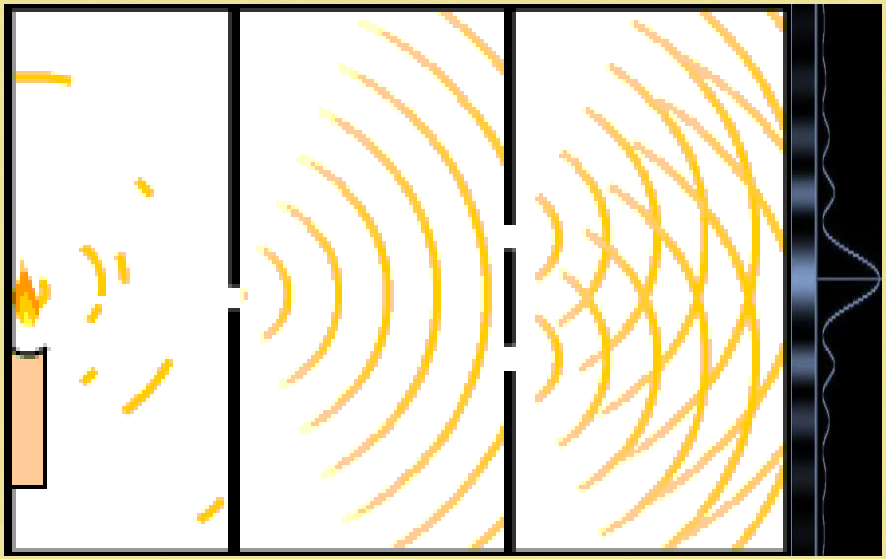
TRATADO DE ÓPTICA (1718)

NOTAS HISTÓRICAS

THOMAS YOUNG (1773-1829)

En 1801, Young demostró la naturaleza ondulatoria de la luz mostrando que los rayos de luz pueden interferir unos con otros.

Experimento de interferencia de la doble rendija



Medición de la velocidad de la luz

Método de Armand Fizeau (1849)

- Mide el intervalo de tiempo total durante el cual la luz viaja desde cierto punto hacia a un espejo distante y de regreso.
- La rueda dentada giratoria, convierte el haz continuo de luz en una serie de pulsos luminosos.
- La rapidez de la luz es: c = $2d/\Delta t$.
- Al conocer la distancia d, el número de dientes de la rueda y la rapidez angular de ésta, Fizeau llegó a un valor de c = 3.1 x 108 m/s.
- Mediciones similares hechas por otros investigadores dieron valores más precisos.
- El valor actualmente aceptado es: c = 2.99 x 10^8 m/s.

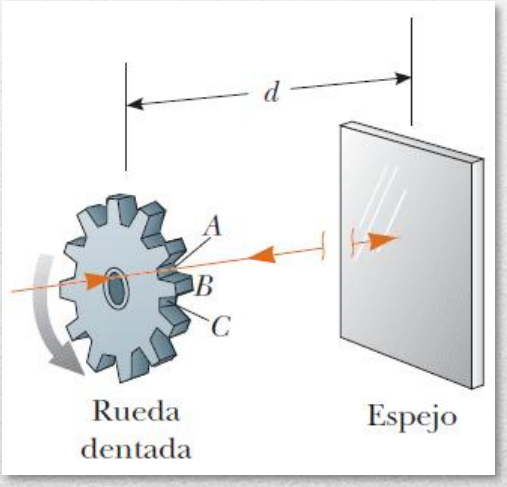
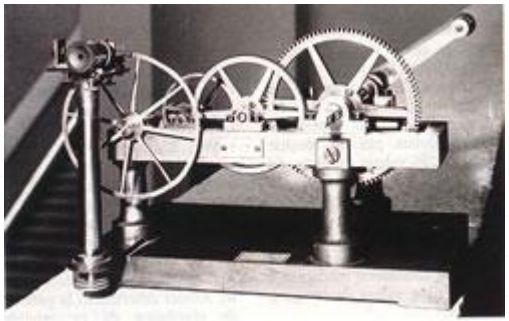


Diagrama simplificado del aparato de Fizeau

EJEMPLO 35.1 Medición de la rapidez de la luz con la rueda de Fizeau

Suponga que la rueda de Fizeau tiene 360 dientes y da vueltas a 27.5 rev/s cuando un pulso de luz que pasa a través de la abertura A en la figura 35.2 es bloqueado por el diente B a su regreso. Si la distancia al espejo es de 7500 m, ¿cuál es la rapidez de la luz?



SOLUCIÓN

Analizar La rueda tiene 360 dientes, así que debe tener 360 aberturas. Por lo tanto, porque la luz pasa a través de la abertura A pero es bloqueada por el diente inmediatamente adyacente a A, la rueda debe dar vuelta a través de una desplazamiento angular de $\frac{1}{720}$ rev en el intervalo de tiempo durante el cual el pulso de luz hace su viaje redondo.

Use el modelo de objeto rígido bajo rapidez angular constante para encontrar el intervalo de tiempo para el viaje redondo del pulso:

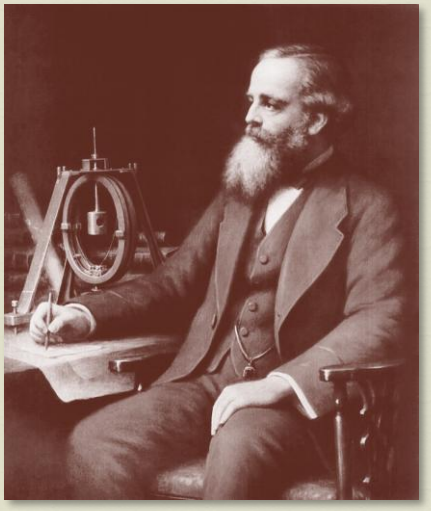
$$\Delta t = \frac{\Delta\theta}{\omega} = \frac{\frac{1}{720}\ \text{rev}}{27.5\ \text{rev/s}} = 5.05 \times 10^{-5}\ \text{s}$$

A partir del modelo de partícula bajo rapidez constante, encuentre la rapidez del pulso de luz:

$$c = \frac{2d}{\Delta t} = \frac{2(7500\ \text{m})}{5.05 \times 10^{-5}\ \text{s}} = 2.97 \times 10^{8}\ \text{m/s}$$

Finalizar Este resultado está muy cerca del valor real de la rapidez de la luz.

TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA



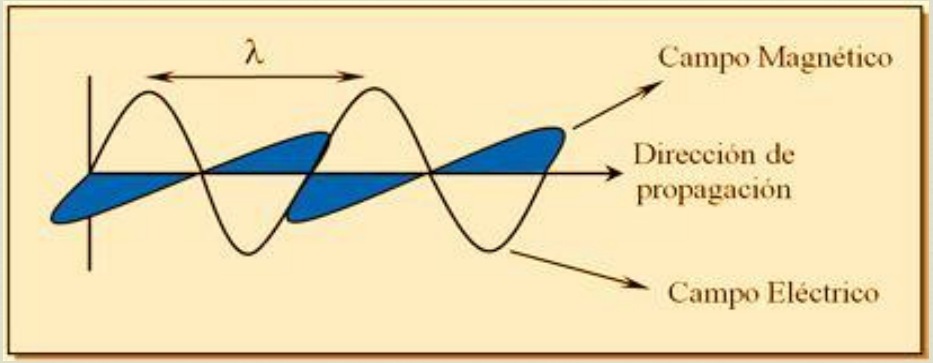
James Clerk Maxwell (1831-1879)

☙ ***Describe por completo los fenómenos eléctricos y magnéticos.***

"A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" (1865)

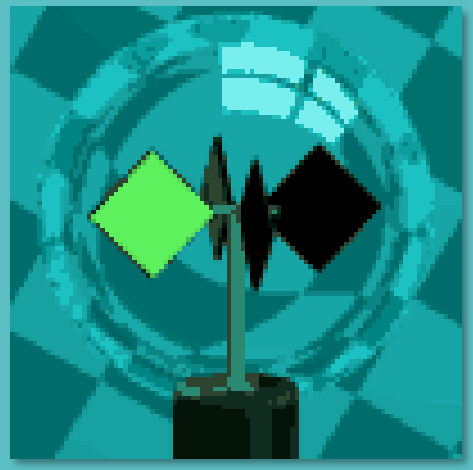
La Teoría Electromagnética:

- Describe los fenómenos eléctricos y magnéticos mediante 4 ecuaciones diferenciales vectoriales.
- Predice la existencia de ondas electromagnéticas con distintas frecuencias y longitudes de onda.



FÍSICA BÁSICA

ÓPTICA GEOMÉTRICA



POLIGONO EDICIONES

CLASE DE FÍSICA ILUSTRADA

Contenidos

DECLARATIVOS

III. ÓPTICA.

1. Iluminación y fotometría: intensidad luminosa; fuente puntual isotrópica; flujo luminoso; iluminación; principio de fotometría.
2. Reflexión de la luz: ley de la reflexión; espejos planos; espejos esféricos.
3. Refracción de la luz: velocidad de la luz en distintos medios; refracción e índice de refracción; Ley de *Snell*; ángulo crítico para una reflexión total interna; prismas.
4. Tipos de lentes (convergente y divergente); relación objeto-imagen; potencia.
5. Instrumentos ópticos: combinaciones de lentes; lupas; microscopios; telescopios.
6. Interferencia y difracción de la luz: ondas coherentes; fase relativa; efectos de la interferencia; difracción; límite de resolución en un instrumento óptico.

Es importante mencionar que los temas se cubrirán de manera completa más no exhaustiva.

Curso de Física Avanzada

LUZ Y ÓPTICA

Naturaleza de la luz y leyes de óptica geométrica

Formación de las imágenes

Interferencia de ondas de luz

Patrones de difracción y polarización

- Naturaleza de la luz
- Mediciones de la rapidez de la luz
- Aproximación de un rayo en óptica geométrica
- La onda bajo reflexión
- La onda bajo refracción
- Principio de Huygens
- Dispersión
- Reflexión interna total

El sol rojo del atardecer

Esta fotografía muestra un arco iris secundario con los colores invertidos. La aparición del arco iris depende de tres fenómenos ópticos que se estudian en este capítulo: reflexión, refracción y dispersión.

La paradoja de Olbers:

En un universo estático e infinito el cielo nocturno debería ser totalmente brillante sin regiones oscuras o desprovistas de luz.

Heinrich Wilhelm Olbers 1823

Si el universo se supone infinito, sin un principio y conteniendo un número infinito de estrellas luminosas uniformemente distribuidas, entonces el número de estrellas a una distancia *R* debería ser proporcional a la superficie de una esfera de ese radio, es decir, $N \sim 4\pi R^2$.

Como la intensidad de la luz sigue una ley de la inversa del cuadrado, entonces la luminosidad aportada por sucesivas capas de estrellas debería ser independiente del radio *R* de la capa, ya que el área aparente de una estrella disminuye con el cuadrado de la distancia y el número de estrellas esperado aumenta con el cuadrado de la distancia.

Así, cada punto en el cielo debería ser tan brillante como la superficie de una estrella.

Olbers se sorprendió al descubrir que su cálculo implicaba que la temperatura en nuestro planeta debería ser de 5.537,78 grados Celsius); debería recibirse luz equivalente a 50.000 veces la del Sol en el cenit, todo estaría fundido como en un volcán.[1]

Procesos Radiativos

Según la teoría de Einstein, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética:

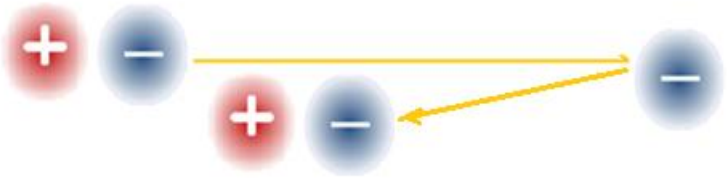
$$E = hf$$ ◀ Energía de un fotón

donde la constante de proporcionalidad $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$ es la *constante de Planck*.

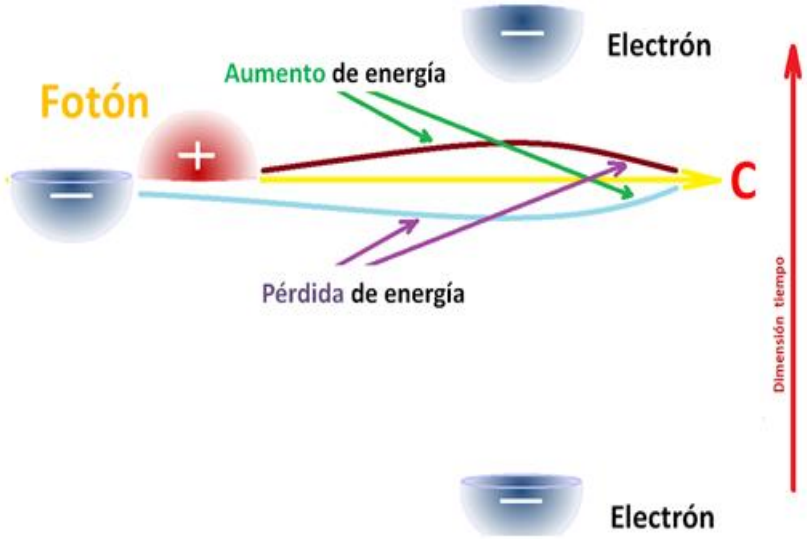
El Fotón

Reflexión
Pierde energía

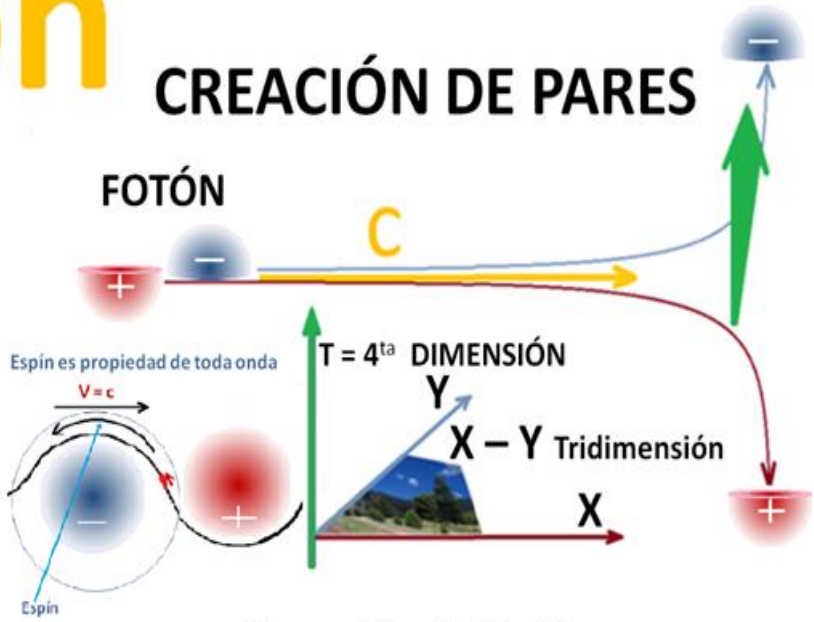
Fotón



Refracción
Variación de la velocidad de la luz en un medio transparente



CREACIÓN DE PARES

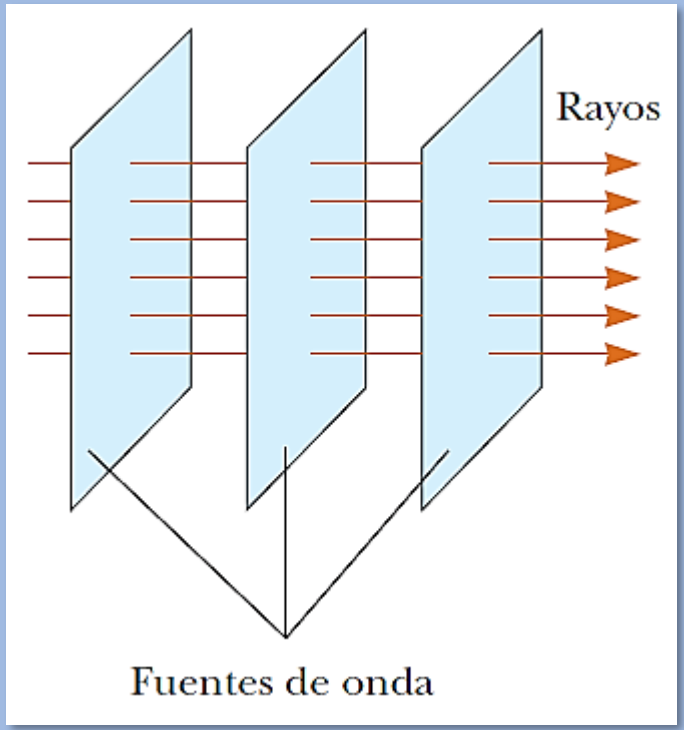


Absorción del Fotón

ÓPTICA GEOMÉTRICA:

Aproximación de un Rayo de Luz

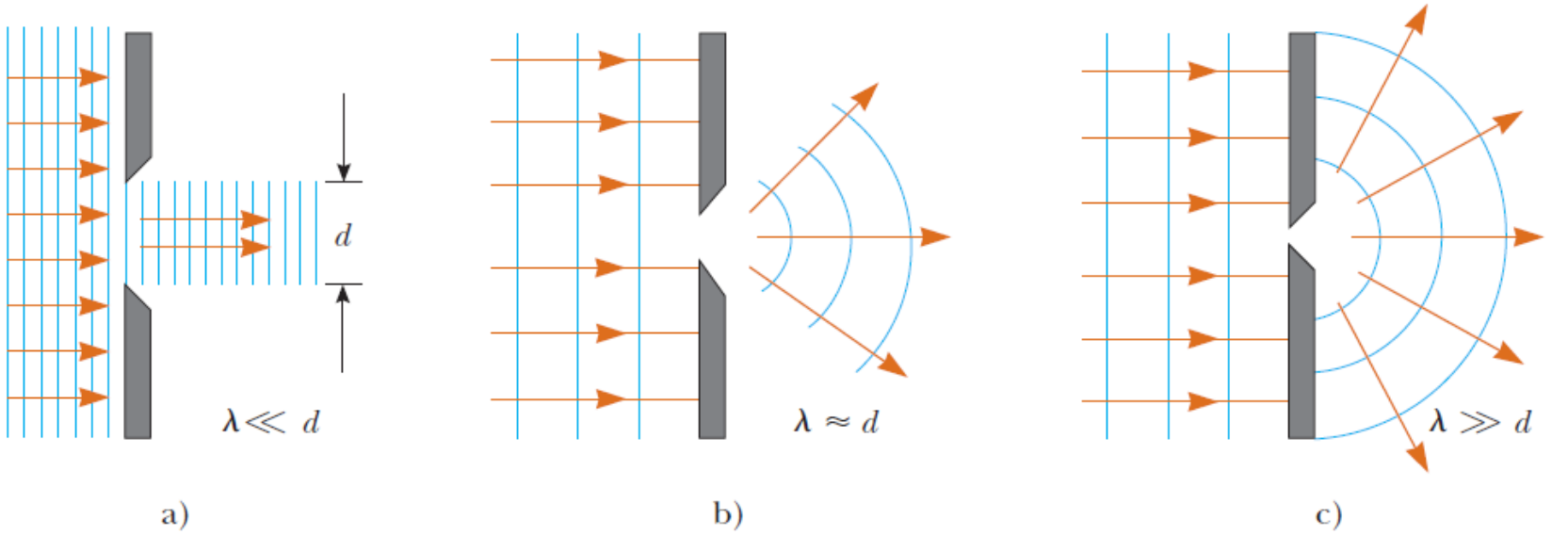
- La luz se desplaza en una dirección fija y en línea recta.
- La luz cambia su dirección al penetrar un medio diferente.
- Los rayos luz son perpendiculares a los frentes de onda.



ÓPTICA GEOMÉTRICA:

Frentes de Onda

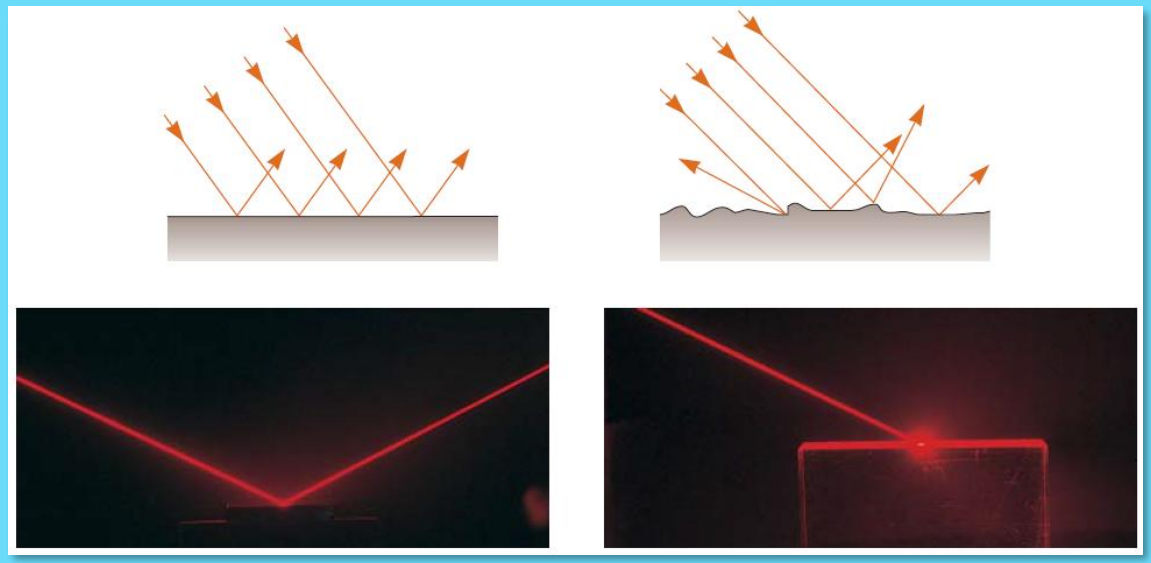
Ondas planas **Fuente puntual**

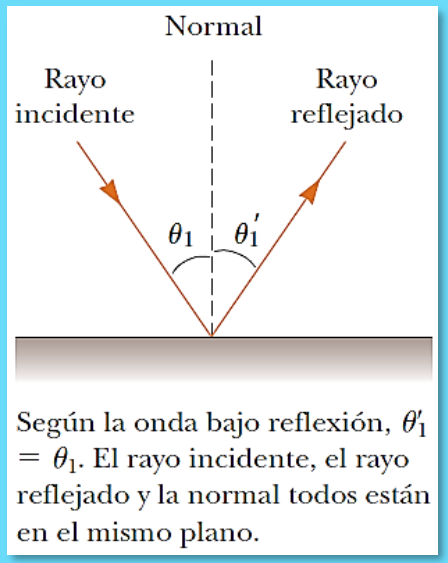


Una onda plana con longitud λ incide sobre una barrera en la que hay una abertura de diámetro d. a) Cuando $\lambda \ll d$, los rayos siguen en una trayectoria en línea recta, y la aproximación de rayo continúa siendo válida. b) Cuando $\lambda \approx d$, los rayos se extienden después de pasar por la abertura. c) Cuando $\lambda \gg d$, la abertura se comporta como fuente puntual que emite ondas esféricas.

ÓPTICA GEOMÉTRICA:

Ley de la Reflexión





Según la onda bajo reflexión, $\theta_1' = \theta_1$. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal todos están en el mismo plano.

REFLEXIÓN ESPECULAR

REFLEXIÓN DIFUSA

ley de reflexión

$$\theta_1' = \theta_1$$

EJEMPLO 35.2 El rayo de luz doblemente reflejado

Dos espejos forman un ángulo de 120° entre sí, como se ilustra en la figura 35.7a. Un rayo incide sobre el espejo M_1 con un ángulo de 65° con la normal. Encuentre la dirección del rayo después de que se refleja del espejo M_2.

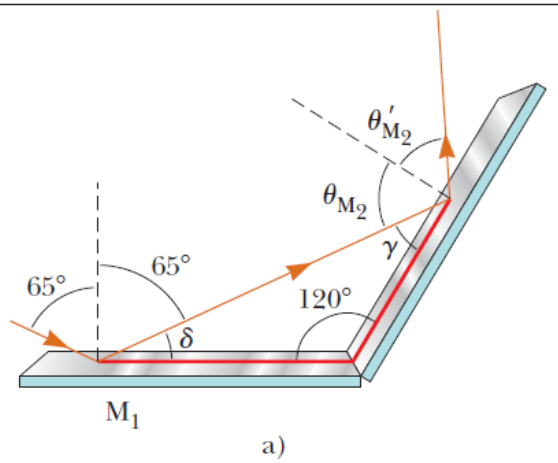


Figura 35.7 (Ejemplo 35.2) a) Los espejos M_1 y M_2 forman un ángulo de 120° uno con otro.

SOLUCIÓN

Analizar A partir de la ley de reflexión, el primer rayo reflejado forma un ángulo de 65° con la normal.

Encuentre el ángulo que forma el primer rayo reflejado con la horizontal:

$$\delta = 90° - 65° = 25°$$

A partir del triángulo formado por el primer rayo reflejado y los dos espejos, encuentre el ángulo que el rayo reflejado forma con M_2:

$$\gamma = 180° - 25° - 120° = 35°$$

Encuentre el ángulo que el primer rayo reflejado forma con la normal a M_2:

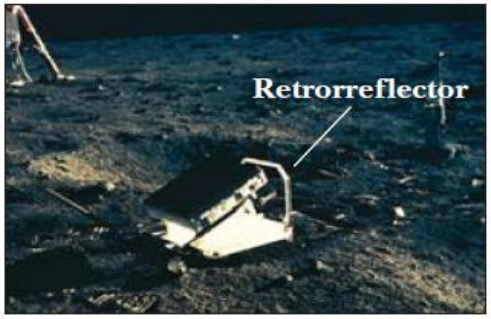
$$\theta_{M_2} = 90° - 35° = 55°$$

A partir de la ley de reflexión, encuentre el ángulo que el segundo rayo reflejado forma con la normal a M_2:

$$\theta'_{M_2} = \theta_{M_2} = 55°$$

Retrorreflexión

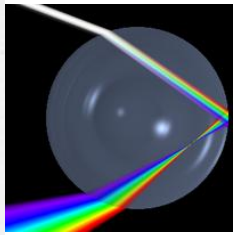
Si el ángulo entre dos espejos es igual a 90, el haz reflejado regresa a la fuente paralelo a su trayectoria original.

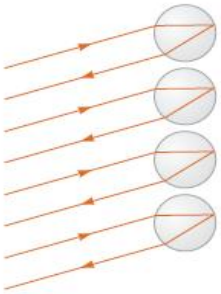


Cortesía de NASA.

a)

b)





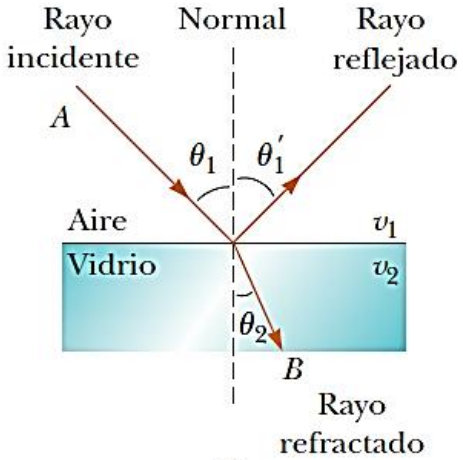
c)

d)

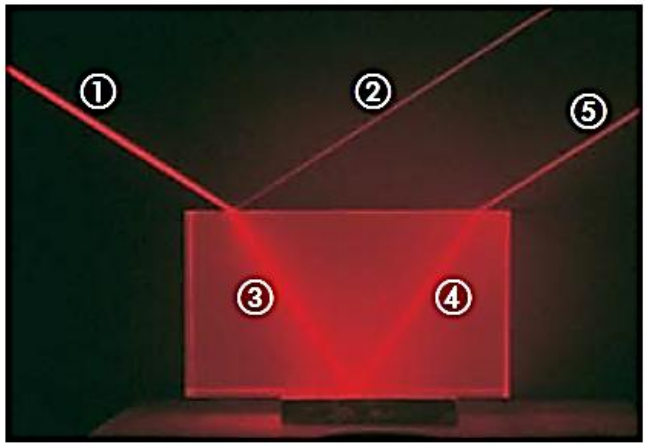
Figura 35.8 Aplicaciones de la retrorreflexión. a) Este panel en la Luna refleja un rayo láser directamente hacia su fuente en la Tierra. b) La luz trasera de un automóvil tiene pequeños retrorreflectores que aseguran que las luces delanteras sean reflejadas directamente hacia el auto que las envía. c) Un rayo de luz que incide en una esfera transparente en la posición apropiada es retrorreflectado. d) El señalamiento *stop* (alto) parece brillar por las luces delanteras de los vehículos porque su superficie está cubierta con una capa de muchas esferas pequeñísimas retrorreflectoras. ¿Cómo se vería si el señalamiento tuviera una superficie semejante a un espejo?

ÓPTICA GEOMÉTRICA:

Ley de la Refracción



a)



b)

a) Rayo de luz que incide en forma oblicua en una interfase de aire-vidrio que se comporta de acuerdo con el modelo de onda bajo refracción. El rayo refractado se dobla hacia la normal porque $v_2 < v_1$. Todos los rayos y la normal se encuentran en el mismo plano. b) La luz que incide sobre el bloque de lucite se dobla cuando entra y cuando sale de éste.

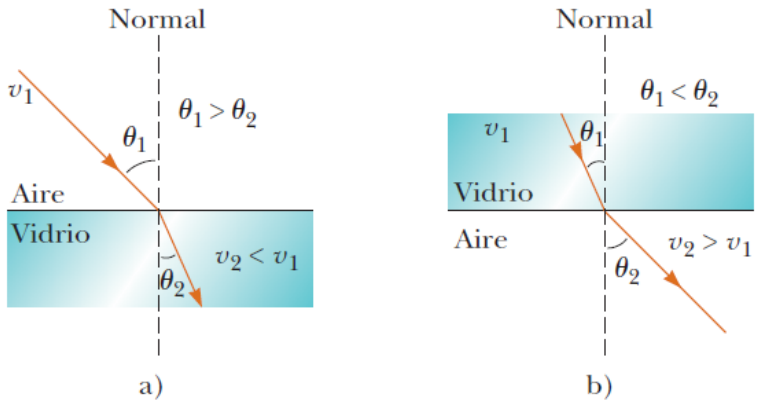
$$\frac{\operatorname{sen}\,\theta_2}{\operatorname{sen}\,\theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

Índice de refracción

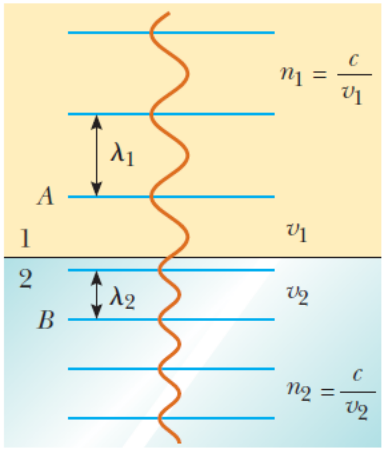
$$n \equiv \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en un medio}} \equiv \frac{c}{v}$$

ÓPTICA GEOMÉTRICA:

Índice de Refracción



a) Cuando un haz de luz pasa del aire al vidrio, la luz disminuye su velocidad al entrar a éste y su trayectoria se dobla hacia la normal. b) Cuando el haz se mueve del vidrio al aire, la luz aumenta su velocidad al entrar al aire y su trayectoria se dobla alejándose de la normal.



Cuando una onda se mueve del medio 1 al medio 2, cambia su longitud de onda, pero su frecuencia permanece constante.

$$n \equiv \frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en un medio}} \equiv \frac{c}{v}$$

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

El rayo en el medio de mayor índice de refracción se acerca siempre a la dirección de la normal a la superficie.

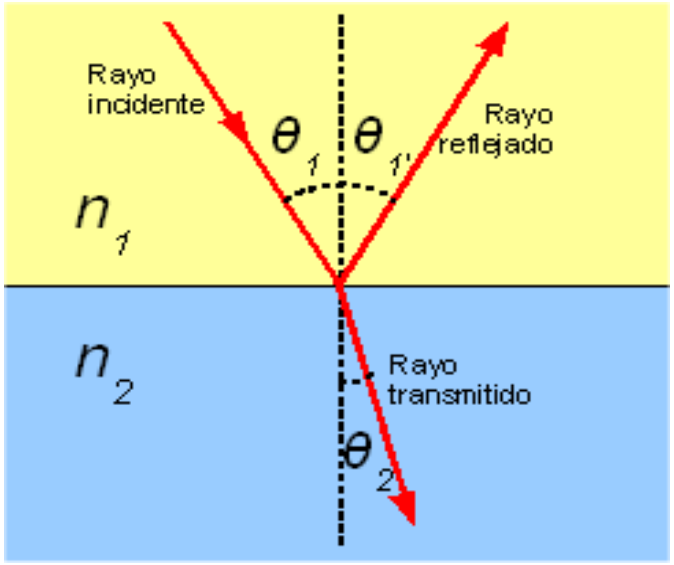
La velocidad de la luz en el medio de mayor índice de refracción es siempre menor.

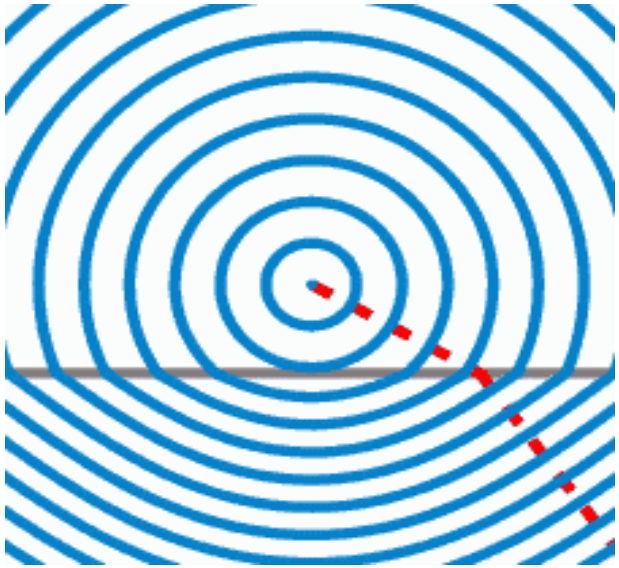
TABLA 35.1

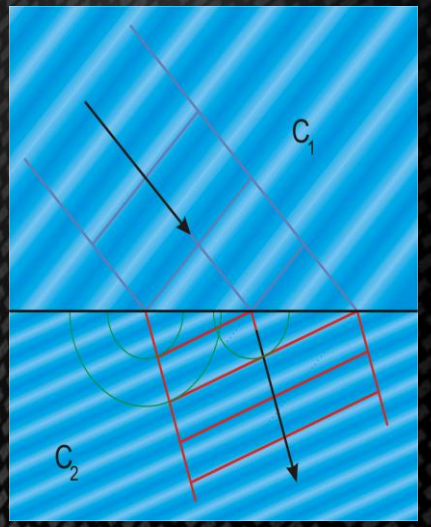
Índices de refracción

Sustancia	Índice de refracción	Sustancia	Índice de refracción
Sólidos a 20°C		*Líquidos a 20°C*	
Circonio cúbico	2.20	Benceno	1.501
Diamante (C)	2.419	Disulfuro de carbono	1.628
Fluorita (CaF_2)	1.434	Tetracloruro de carbono	1.461
Cuarzo fundido (SiO_2)	1.458	Alcohol etílico	1.361
Fosfato de galio	3.50	Glicerina	1.473
Vidrio, sin plomo	1.52	Agua	1.333
Vidrio, con plomo	1.66		
Hielo (H_2O)	1.309	*Gases a 0°C, 1 atm*	
Poliestireno	1.49	Aire	1.000 293
Cloruro de sodio (NaCl)	1.544	Dióxido de carbono	1.000 45

Nota: Todos los valores son para luz cuya longitud de onda sea de 589 nm en el vacío.







EJEMPLO 35.3 Ángulo de refracción para vidrio

Un rayo de luz, de 589 nm de longitud de onda, que viaja a través de aire, incide sobre una lámina plana y uniforme de vidrio sin plomo con un ángulo de 30.0° con la normal.

A) Encuentre el ángulo de refracción.

B) Encuentre la rapidez de esta luz una vez que entra al vidrio.

C) ¿Cuál es la longitud de onda de esta luz en el vidrio?

SOLUCIÓN

A)

Reordene la ley de refracción de Snell para encontrar sen θ_2:

$$\operatorname{sen}\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\operatorname{sen}\theta_1$$

Sustituya el ángulo incidente y, a partir de la tabla 35.1, $n_1 = 1.00$ para aire y $n_2 = 1.52$ para vidrio sin plomo:

$$\operatorname{sen}\theta_2 = \left(\frac{1.00}{1.52}\right)\operatorname{sen}30.0^\circ = 0.329$$

Resuelva para θ_2:

$$\theta_2 = \operatorname{sen}^{-1}(0.329)$$

$$= 19.2^\circ$$

B)

Resuelva la ecuación 35.4 para la rapidez de la luz en el vidrio:

$$v = \frac{c}{n}$$

Sustituya valores numéricos:

$$v = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.52} = 1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$$

C)

Use la ecuación 35.7 para encontrar la longitud de onda en el vidrio:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1.52} = 388 \text{ nm}$$

Resumen

DEFINICIÓN

El **índice de refracción** n de un medio se define mediante la relación

$$n \equiv \frac{c}{v} \qquad (35.4)$$

donde c es la rapidez de la luz en un vacío y v es la rapidez de la luz en el medio.

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

En óptica geométrica se usa la **aproximación de rayo**, en donde una onda viaja a través de un medio uniforme en líneas rectas en la dirección de los rayos.

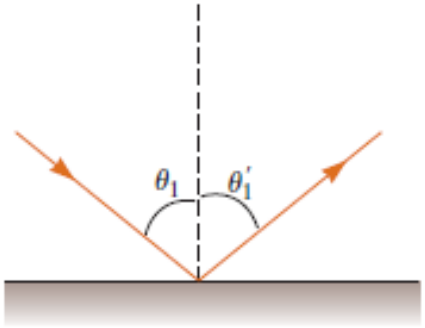
La **reflexión interna total** se presenta cuando la luz viaja de un medio con alto índice de refracción a uno con menor índice de refracción. El **ángulo crítico** θ_c para el que se presenta la reflexión interna total en una interfaz se conoce por

$$\operatorname{sen} \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{para } n_1 > n_2) \qquad (35.10)$$

MODELOS DE ANÁLISIS PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Onda bajo reflexión. La **ley de reflexión** afirma que, para un rayo de luz (u otro tipo de onda) incidente sobre una superficie uniforme, el ángulo de reflexión θ_1' es igual al ángulo de incidencia θ_1:

$$\theta_1' = \theta_1 \qquad (35.2)$$



Onda bajo refracción. Una onda que cruza una frontera conforme viaja del medio 1 al medio 2 se **refracta** o dobla. El ángulo de refracción θ_2 se relaciona con el ángulo incidente θ_1 mediante la correspondencia

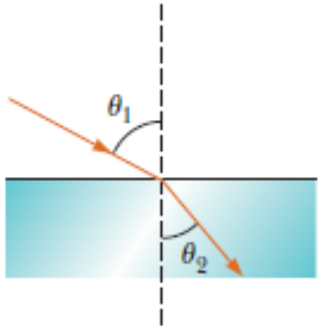
$$\frac{\operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} \qquad (35.3)$$

donde v_1 y v_2 son las magnitudes de velocidad de la onda en los medios 1 y 2, respectivamente. El rayo incidente, el rayo reflejado, el rayo refractado y la normal a la superficie se encuentran todos en el mismo plano.

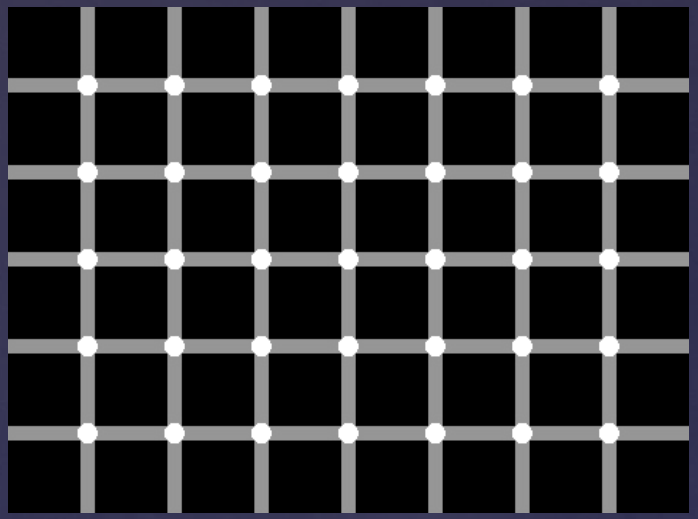
Para ondas de luz, la **ley de refracción de Snell** afirma que

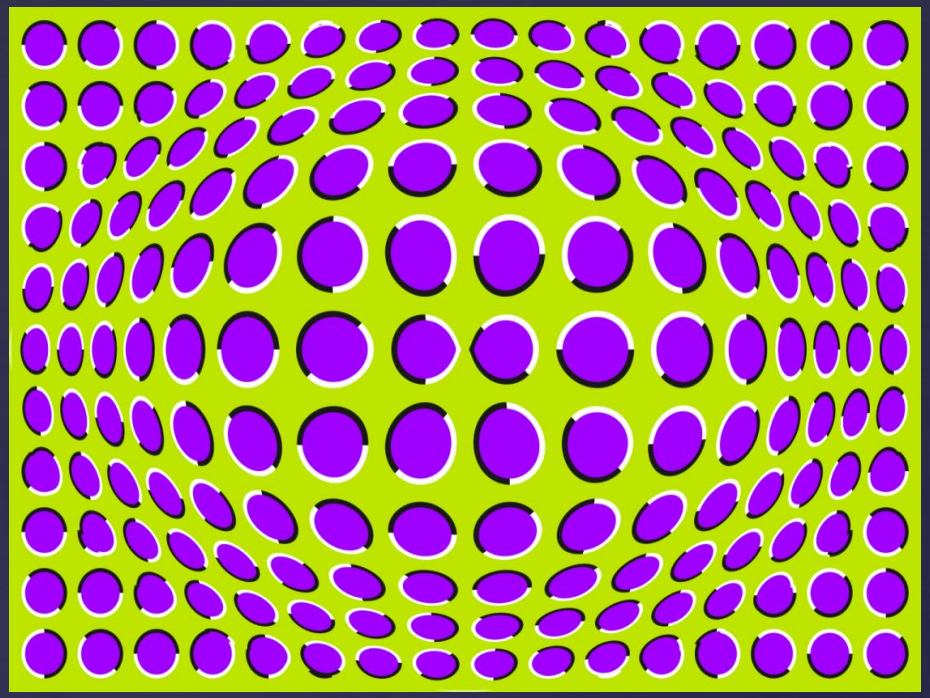
$$n_1 \operatorname{sen}\theta_1 = n_2 \operatorname{sen}\theta_2 \qquad (35.8)$$

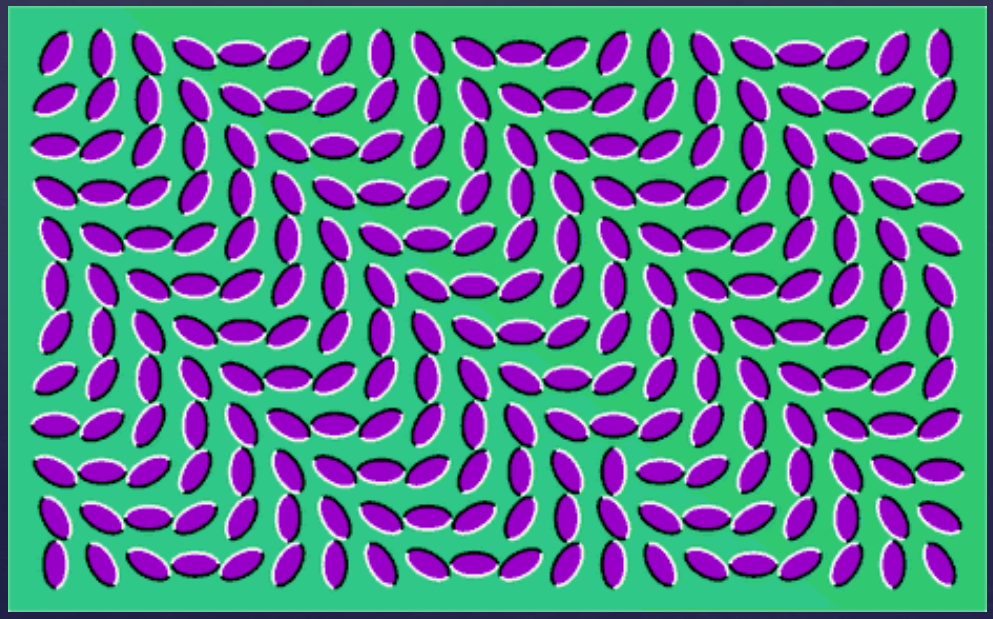
donde n_1 y n_2 son los índices de refracción en los dos medios.

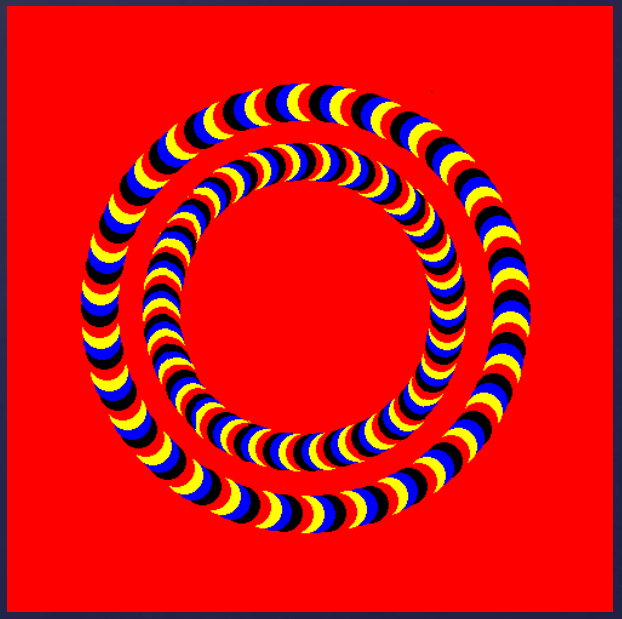


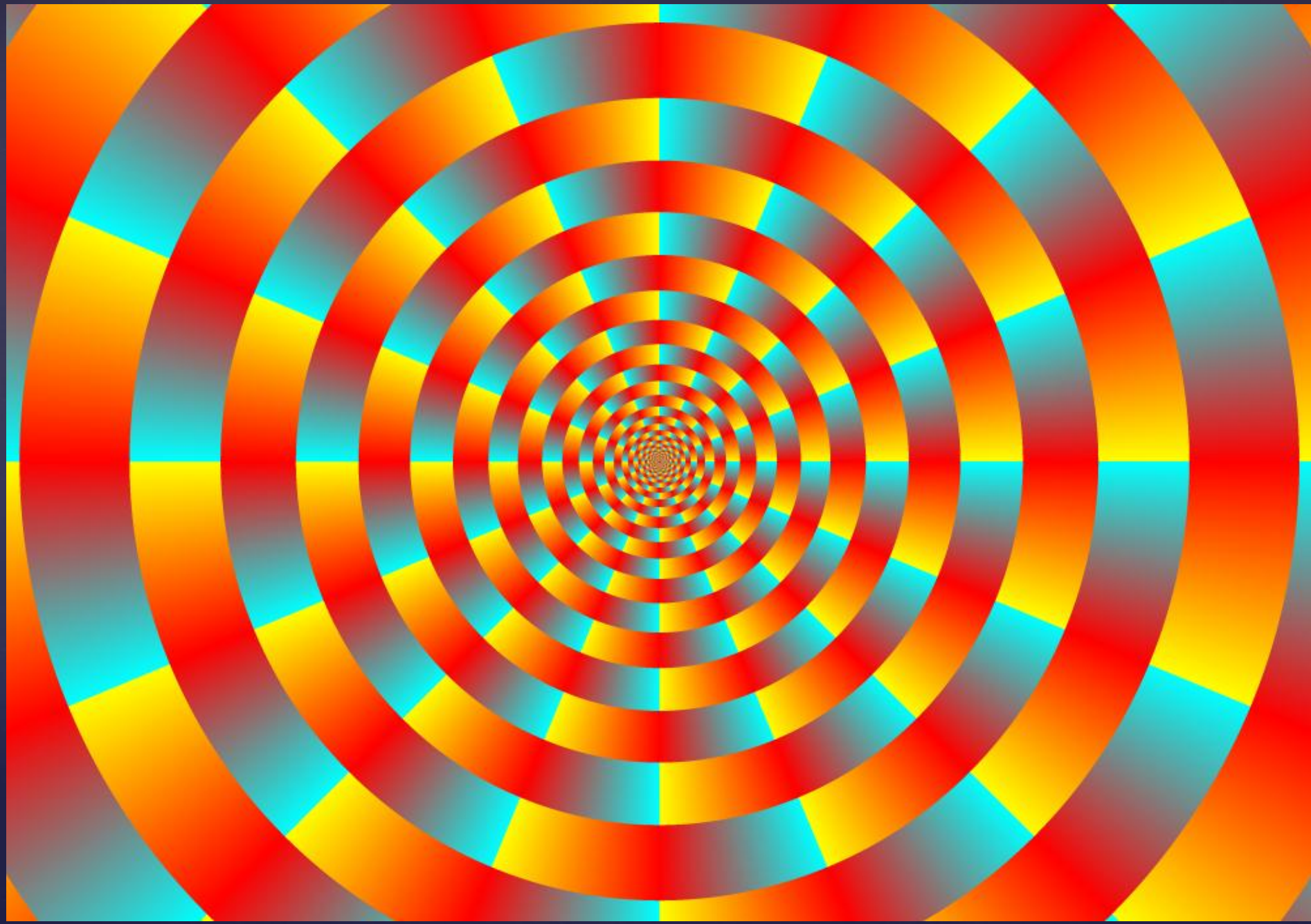
ILUSIÓNES ÓPTICAS











Curso de Física Avanzada

LUZ Y ÓPTICA

Naturaleza de la luz y leyes de óptica geométrica

Formación de las imágenes

Interferencia de ondas de luz

Patrones de difracción y polarización

Imágenes formadas por espejos planos
Imágenes formadas por espejos esféricos
Imágenes formadas por refracción
Lentes delgadas
Aberraciones de las lentes

La cámara fotográfica
El ojo humano
La lupa simple
El microscopio compuesto
El telescopio

Formación de las imágenes

las imágenes que resultan cuando los rayos luminosos inciden sobre superficies planas y curvas. Las imágenes se forman, ya sea por reflexión o por refracción, y es posible diseñar espejos y lentes para formar imágenes que tengan las características que desee.

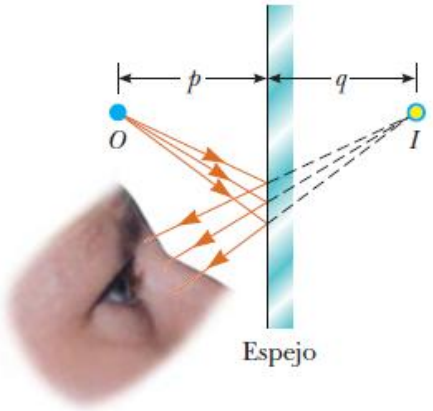


Figura 36.1 Imagen formada por reflexión en un espejo plano. El punto de imagen *I* está localizado por detrás del espejo a una distancia perpendicular *q* de éste (la distancia de imagen). La distancia de imagen tiene la misma magnitud que la distancia de objeto *p*.

El punto *I*, que está a una distancia *q* detrás del espejo, se conoce como **imagen** del objeto en *O*. A la distancia *q* se le llama **distancia de imagen**.

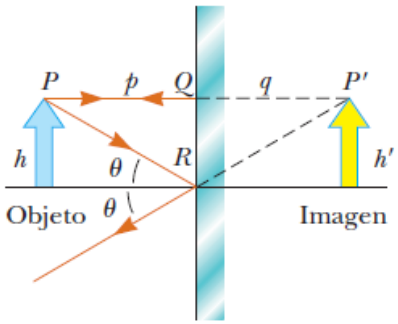


Figura 36.2

Construcción geométrica utilizada para localizar la imagen de un objeto colocado frente a un espejo plano. Porque los triángulos *PQR* y *P′QR* son congruentes, $|p| = |q|$ y $h = h'$.

$$M \equiv \frac{\text{Altura de la imagen}}{\text{Altura del objeto}} = \frac{h'}{h}$$

◀ Aumento lateral

Pregunta rápida 36.1 Imagine que está de pie a aproximadamente dos metros de un espejo, y que éste tiene gotas de agua sobre su superficie. Verdadero o falso: ¿es posible ver simultáneamente en foco las gotas de agua, así como su propia imagen?

EJEMPLO CONCEPTUAL 36.1 Varias imágenes formadas por dos espejos

Dos espejos planos han sido colocados en forma perpendicular entre sí, como se observa en la figura 36.4, y se coloca un objeto en el punto *O*. En esta situación se forman varias imágenes. Localice las posiciones de dichas imágenes.

SOLUCIÓN La imagen del objeto está en I_1 en el espejo 1 (rayos violetas) y en I_2 en el espejo 2 (rayos azules). Además, se forma una tercera imagen en I_3 (rayos cafés). Esta tercera imagen es la imagen de I_1 que se forma en el espejo 2 o, de manera equivalente, la imagen de I_2 que se forma sobre el espejo 1. Es decir, la imagen en I_1 (o en I_2) sirve como objeto para I_3. Advierta que para formar esta imagen en I_3, los rayos tienen que reflejarse dos veces después de salir del objeto en *O*.

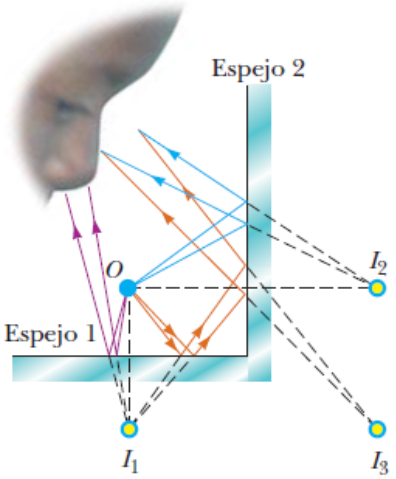


Figura 36.4 (Ejemplo conceptual 36.1) Cuando se coloca un objeto frente a dos espejos mutuamente perpendiculares, como se muestra en la figura, se forman tres imágenes. Siga los rayos de luz de colores para comprender la formación de cada imagen.

Imágenes formadas por espejos esféricos

Espejos cóncavos

Ahora considere una fuente de luz puntual colocada en el punto O de la figura 36.6b, donde O es cualquier punto sobre el eje principal, a la izquierda de C. En la figura se muestran dos rayos divergentes que se originan en O. Después de reflejarse en el espejo, estos rayos convergen y se cruzan en la imagen que aparece en el punto I. Después continúan divergiendo alejándose de I como si en ese punto existiera un objeto. Como resultado, la imagen en el punto I es real.

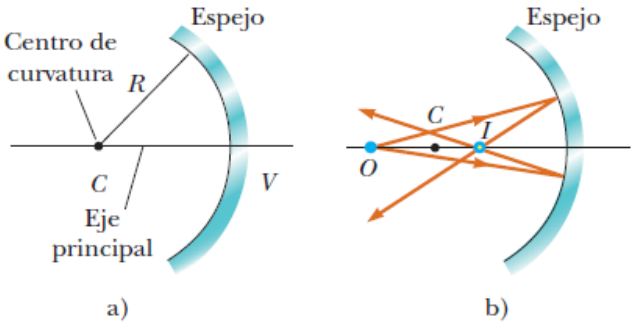


Figura 36.6 a) Espejo cóncavo de radio R. El centro de la curvatura C está ubicado sobre el eje principal. b) Un objeto puntual colocado en O frente a un espejo esférico cóncavo de radio R, donde O es cualquier punto a lo largo del eje principal alejado una distancia mayor que R de la superficie del espejo, forma una imagen real en I. Si los rayos divergen de O en ángulos pequeños, todos ellos se reflejan a través del mismo punto de imagen.

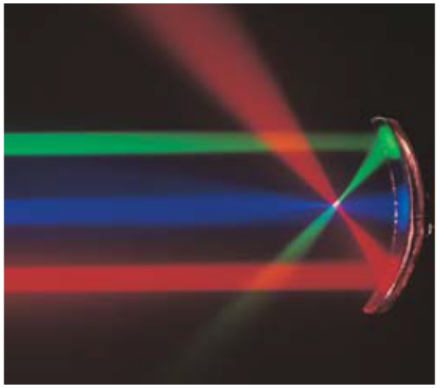


Figura 36.7 Los rayos de colores rojo, azul y verde son reflejados por un espejo curvo. Observe que los tres haces de color se unen en un punto.

Para calcular la distancia de la imagen q utilice la figura 36.9, si conoce la distancia objeto p y el radio de curvatura R. Por regla, estas distancias se observan a partir del punto V. La figura 36.9 muestra dos rayos que salen de la punta del objeto. Uno de estos rayos pasa a través del centro de curvatura C del espejo e incide en el espejo, perpendicular a la superficie del mismo, reflejándose de regreso sobre sí mismo. El segundo rayo incide en el espejo en su centro (punto V) y se refleja como se muestra, en cumplimiento con la ley de la reflexión. La imagen de la punta de la flecha se localiza en el punto donde se cruzan ambos rayos. En el amplio triángulo rectángulo color oro de la figura 36.9, $\tan\theta = h/p$, y con el triángulo rectángulo azul vemos que $\tan\theta = -h'/q$. Se introduce el signo negativo porque la imagen está invertida, por lo que h' se considera negativa. En consecuencia, por la ecuación 36.1 y por estos resultados, encontramos que el aumento de la imagen es igual a

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \tag{36.2}$$

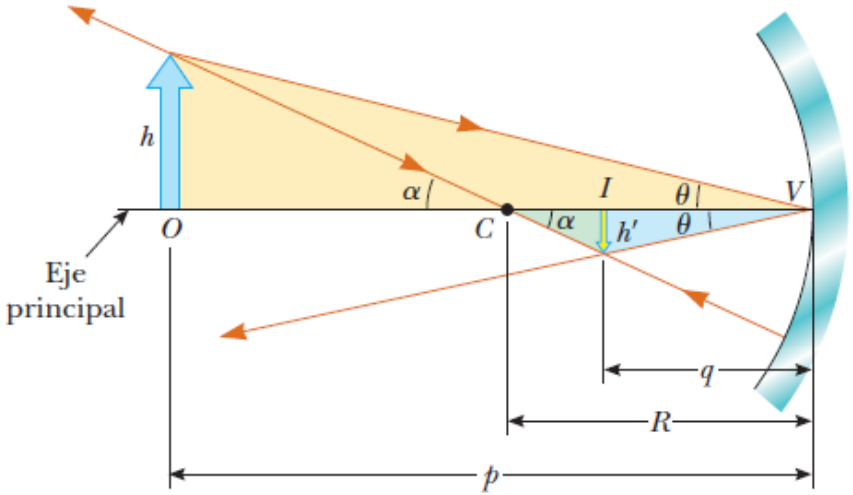


Figura 36.9 Imagen formada por un espejo esférico cóncavo cuando el objeto O yace fuera del centro de curvatura C. Esta es la construcción geométrica utilizada para deducir la ecuación 36.4.

Además observe del triángulo recto verde en la figura 36.9 y del triángulo rectángulo dorado más pequeño que

$$\tan \alpha = \frac{-h'}{R - q} \qquad \text{y} \qquad \tan \alpha = \frac{h}{p - R}$$

de donde surge

$$\frac{h'}{h} = -\frac{R - q}{p - R}$$

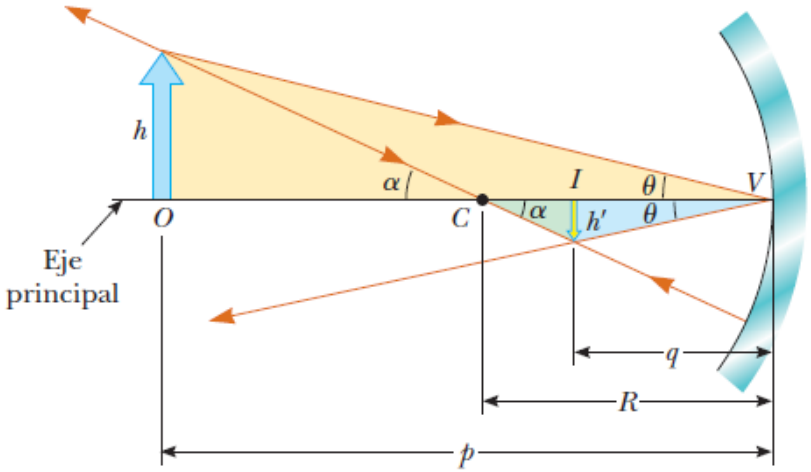
Si compara las ecuaciones 36.2 y 36.3,

$$\frac{R - q}{p - R} = \frac{q}{p}$$

Por simple álgebra, lo anterior se reduce a

Ecuación del espejo en función del radio de curvatura

$$\blacktriangleright \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$



Si el objeto está muy lejos del espejo —es decir, si p es mucho más grande que R de forma que se puede decir que p tiende a infinito— entonces $1/p \approx 0$, y por la ecuación 36.4 $q \approx R/2$. Es decir, cuando el objeto está muy lejos del espejo, el punto imagen está a la mitad del camino entre el centro de curvatura y el punto central sobre el espejo, como se observa en la figura 36.10a. Los rayos incidentes del objeto son esencialmente paralelos en esta figura porque se supone que la fuente está muy lejos del espejo. En este caso en especial, se le llama al punto de imagen **foco** F y a la distancia de imagen **distancia focal** f, donde

Distancia focal ▶ $$f = \frac{R}{2}$$

Ecuación del espejo en función de la distancia focal ▶ $$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

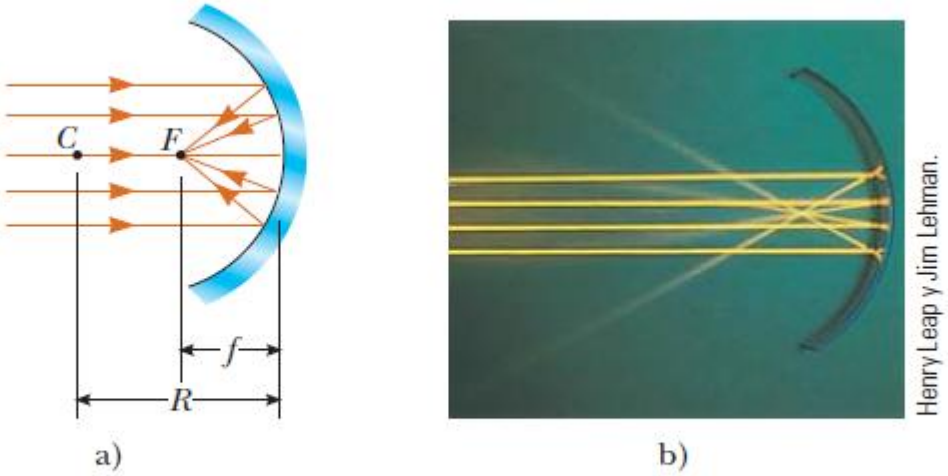


Figura 36.10 a) Rayos de luz de un objeto distante ($p \to \infty$) se reflejan de un espejo cóncavo a través del **foco** F. En este caso, la distancia imagen $q \approx R/2 = f$, donde esta última es la distancia focal del espejo. b) Reflexión de rayos paralelos provenientes de un espejo cóncavo.

Espejos convexos

Se les conoce como **espejos divergentes** porque los rayos de cualquier punto de un objeto divergen después de haberse reflejado, como si vinieran de algún punto de detrás del espejo.

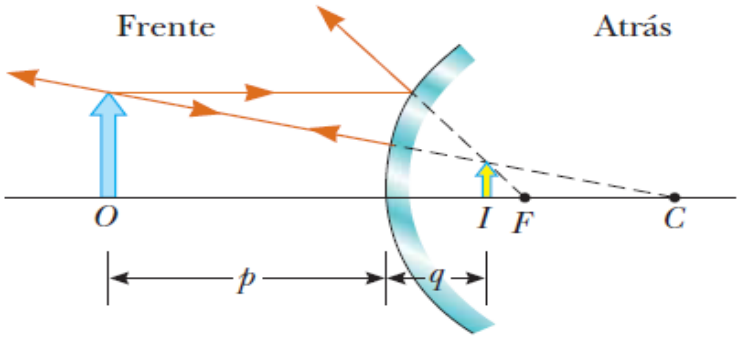


Figura 36.11 Formación de una imagen en un espejo esférico convexo. La imagen formada por el objeto real es virtual y vertical.

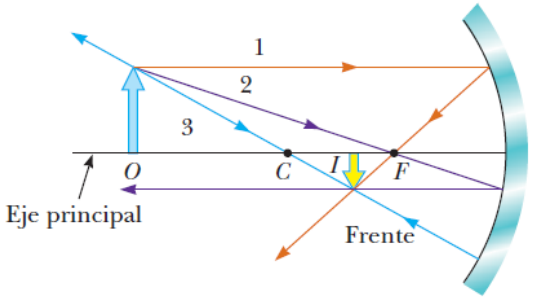
Reglas para los signos de los espejos

Cantidad	Positivos cuando. . .	Negativos cuando. . .
Localización del objeto (p)	el objeto está delante del espejo (objeto real)	el objeto está detrás del espejo (objeto virtual)
Localización de la imagen (q)	la imagen está delante del espejo (imagen real)	la imagen está detrás del espejo (imagen virtual)
Altura de la imagen (h')	la imagen está vertical	la imagen está invertida
Distancia focal (f) y radio (R)	el espejo es cóncavo	el espejo es convexo
Aumento (M)	la imagen está vertical	la imagen está invertida

Diagramas de rayos para los espejos

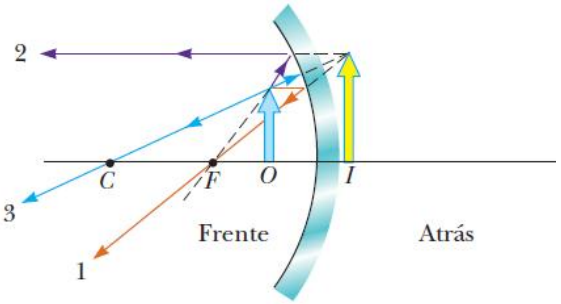
- El rayo 1, desde la parte superior del objeto, en paralelo al eje principal, y se refleja a través del foco *F*.
- El rayo 2, desde la parte superior del objeto a través del foco (o como si viniera del foco si $p < f$) y se refleja paralelo al eje principal.
- El rayo 3, desde la parte superior del objeto a través del centro de curvatura *C* y se refleja de regreso sobre sí mismo.

La intersección de cualesquiera de estos dos rayos permite ubicar la imagen. El tercero sirve para verificar la construcción. El punto imagen obtenido de esta manera siempre debe concordar con el valor de *q* calculado a partir de la ecuación del espejo. En el caso de los espejos cóncavos, observe lo que ocurre cuando se acerca el objeto al espejo.



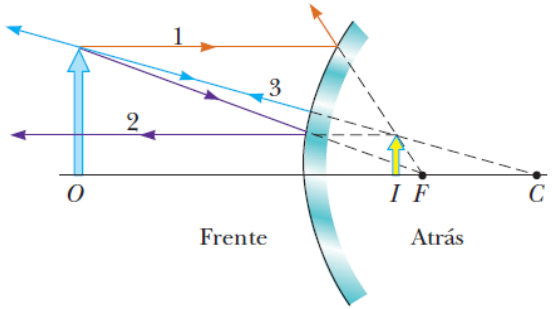
a)

Cuando el objeto está localizado de manera que el centro de curvatura está entre el objeto y una superficie de espejo cóncavo, la imagen es real, invertida y de tamaño reducido.



b)

el objeto está localizado entre el foco y la superficie de un espejo cóncavo, la imagen es virtual, vertical y alargada.



c)

el objeto está frente a un espejo convexo, la imagen es virtual, vertical y de tamaño reducido.

EJEMPLO 36.3 Imagen formada por un espejo cóncavo

Un espejo esférico tiene una distancia focal de +10.0 cm.

A) Ubique y describa la imagen para una distancia de objeto de 25.0 cm.

B) Ubique y describa la imagen para una distancia de objeto de 10.0 cm.

C) Ubique y describa la imagen para una distancia de objeto de 5.00 cm.

SOLUCIÓN

A)

Analizar Encuentre la distancia de imagen:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{10.0\ \text{cm}} - \frac{1}{25.0\ \text{cm}}$$

$$q = 16.7\ \text{cm}$$

Encuentre el aumento de la imagen:

$$M = -\frac{q}{p} = -\frac{16.7\ \text{cm}}{25.0\ \text{cm}} = -0.668$$

Finalizar El valor absoluto de M es menor que la unidad, así que la imagen es más pequeña que el objeto, y el signo negativo para M dice que la imagen está invertida. Porque q es positiva, la imagen se ubica en la cara frontal del espejo y es real. Mire en la concavidad de una cuchara pulida o párese lejos de un espejo de afeitar para ver esta imagen.

EJEMPLO 36.3 Imagen formada por un espejo cóncavo

Un espejo esférico tiene una distancia focal de +10.0 cm.

B) Ubique y describa la imagen para una distancia de objeto de 10.0 cm.

SOLUCIÓN

Porque el objeto está en el foco, se espera que la imagen esté infinitamente alejada.

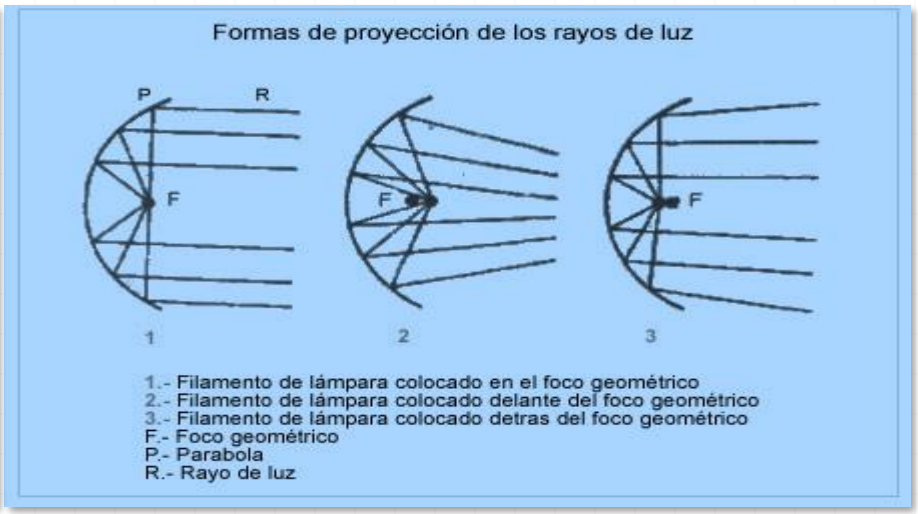
Analizar Encuentre la distancia de imagen:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{10.0\ \text{cm}} - \frac{1}{10.0\ \text{cm}}$$

$$q = \infty$$

Finalizar Este resultado significa que los rayos que se originan desde un objeto colocado en el foco de un espejo se reflejan de modo que la imagen se forma a una distancia infinita del espejo; es decir, los rayos viajan paralelos después de la reflexión. Tal es la situación en una lámpara de mano o el faro de un automóvil, donde el filamento del bulbo se coloca en el foco de un reflector, lo que produce un haz de luz paralelo.



EJEMPLO 36.3 Imagen formada por un espejo cóncavo

Un espejo esférico tiene una distancia focal de +10.0 cm.

C) Ubique y describa la imagen para una distancia de objeto de 5.00 cm.

SOLUCIÓN

Categorizar Ya que la distancia de objeto es menor que la distancia focal, se espera que la imagen sea virtual. Esta situación es análoga a la de la figura 36.13b.

Analizar Encuentre la distancia de imagen con la ecuación 36.6:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{10.0\ \text{cm}} - \frac{1}{5.00\ \text{cm}}$$

$$q = -10.0\ \text{cm}$$

Encuentre el aumento de la imagen a partir de la ecuación 36.2:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-10.0\ \text{cm}}{5.00\ \text{cm}}\right) = +2.00$$

Finalizar La imagen es el doble de grande que el objeto, y el signo positivo para M indica que la imagen es vertical (véase la figura 36.13b). El valor negativo de la distancia de imagen dice que la imagen es virtual, como se esperaba. Ponga la cara cerca de un espejo de afeitar para ver este tipo de imagen.

EJEMPLO 36.4 Imagen formada por un espejo convexo

Un espejo retrovisor, como se muestra en la figura 36.15, muestra la imagen de un camión ubicado a 10.0 m del espejo. La distancia focal del espejo es −0.60 m.

A) Encuentre la posición de la imagen del camión.

B) Encuentre el aumento de la imagen.

Figura 36.15 (Ejemplo 36.4) En el espejo convexo del lado derecho de un automóvil se ve un camión que se aproxima. Ya que la imagen tiene tamaño reducido, el camión aparece más alejado de lo que en realidad está. Además observe que la imagen del camión está en foco, pero el marco del espejo no lo está, lo que demuestra que la imagen no está en la misma ubicación que la superficie del espejo.

SOLUCIÓN

A)

Analizar Encuentre la distancia de la imagen:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{-0.60\ \text{m}} - \frac{1}{10.0\ \text{m}}$$

$$q = -0.57\ \text{m}$$

B)

Analizar

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-0.57\ \text{m}}{10.0\ \text{m}}\right) = +0.057$$

Finalizar El valor negativo de q en el inciso A) indica que la imagen es virtual, o está detrás del espejo, como se muestra en la figura 36.13c. El aumento en el inciso B) indica que la imagen es mucho más pequeña que el camión y es vertical porque M es positiva. Debido al tamaño pequeño de la imagen, estos espejos llevan la inscripción "Los objetos en este espejo están más cerca de lo que aparecen." Observe su espejo retrovisor o la cara posterior de una cuchara brillante para ve una imagen de este tipo.

Imágenes formadas por refracción

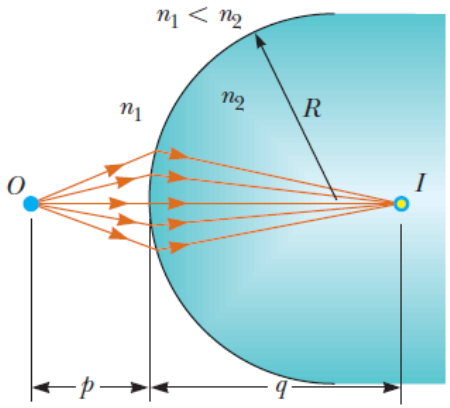


Figura 36.16 Imagen formada por refracción en una superficie esférica. Los rayos que forman ángulos pequeños en relación con el eje principal divergen de un punto en el objeto O y se refractan hasta el punto imagen I.

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

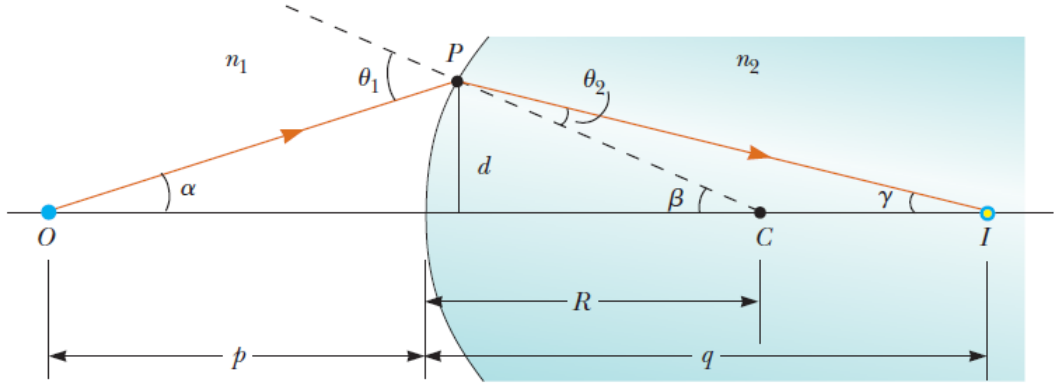


Figura 36.17 Geometría utilizada para deducir la ecuación 36.8, suponiendo que $n_1 < n_2$.

Ya que θ_1 y θ_2 se consideran pequeños, utilice la aproximación para ángulos pequeños sen $\theta \approx \theta$ (ángulos en radianes) y escriba la ley de Snell como

$$n_1\theta_1 = n_2\theta_2$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$

$$\beta = \theta_2 + \gamma$$

Si combina las tres expresiones y elimina θ_1 y θ_2,

$$n_1\alpha + n_2\gamma = (n_2 - n_1)\beta$$

$$\tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{d}{p} \qquad \tan \beta \approx \beta \approx \frac{d}{R} \qquad \tan \gamma \approx \gamma \approx \frac{d}{q}$$

Relación entre distancia objeto y distancia imagen para una superficie refractora ▶

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Superficies refractoras planas

Si una superficie refractora es plana, en tal caso R es infinito y $\dfrac{n_1}{p} = -\dfrac{n_2}{q}$

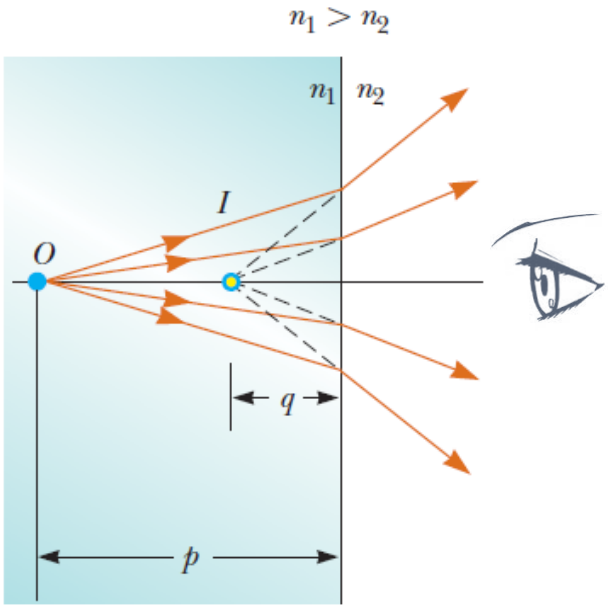


Figura 36.18

La imagen formada por una superficie refractora plana es virtual y aparece del mismo lado de la superficie que el objeto. Todos los rayos se suponen paraxiales.

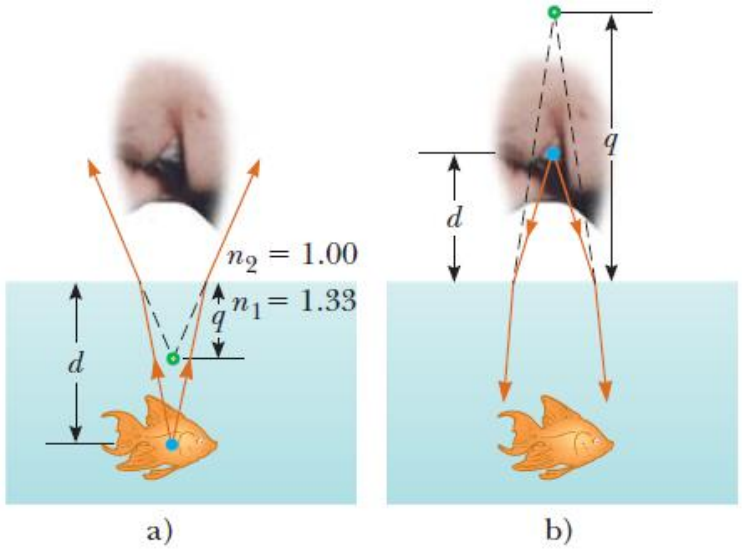
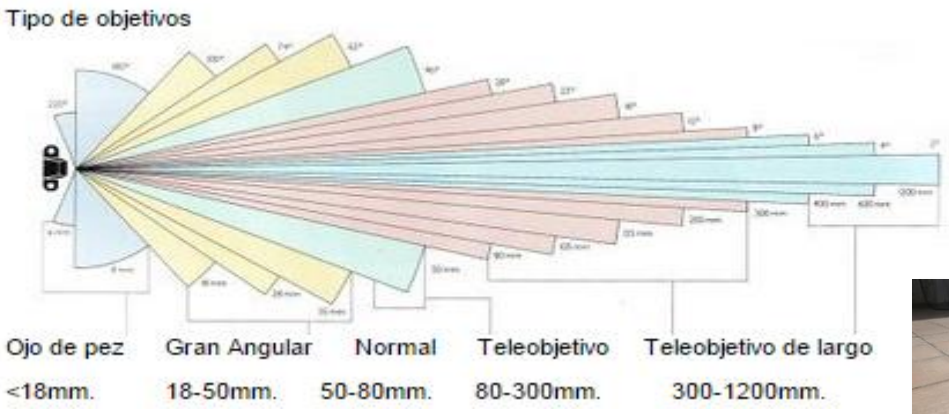
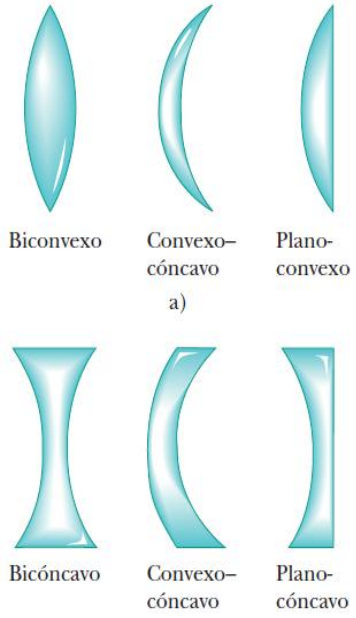


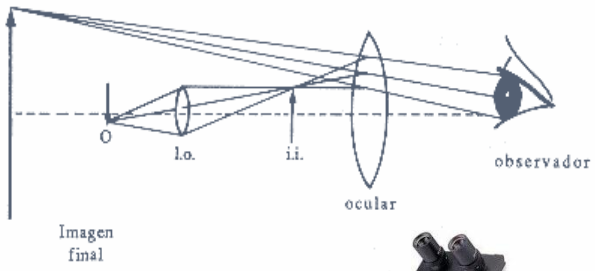
Figura 36.20 (Ejemplo 36.7) a) La profundidad aparente q del pez es menor que la profundidad verdadera d. Se supone que todos los rayos son paraxiales. b) Al pez le parece que la cara de usted es más grande de lo que es.

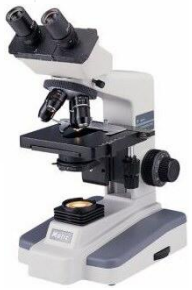
$$q = -\frac{n_2}{n_1}p = -\frac{1.00}{1.33}d = -0.752d$$

Lentes delgadas

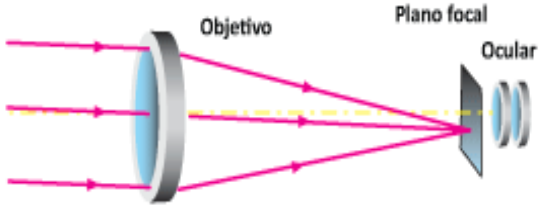




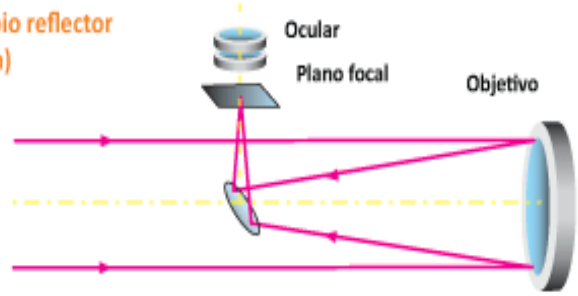




Telescopio refractor



Telescopio reflector (Newton)



Ecuación de los fabricantes de lentes ▶

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

Lentes delgadas

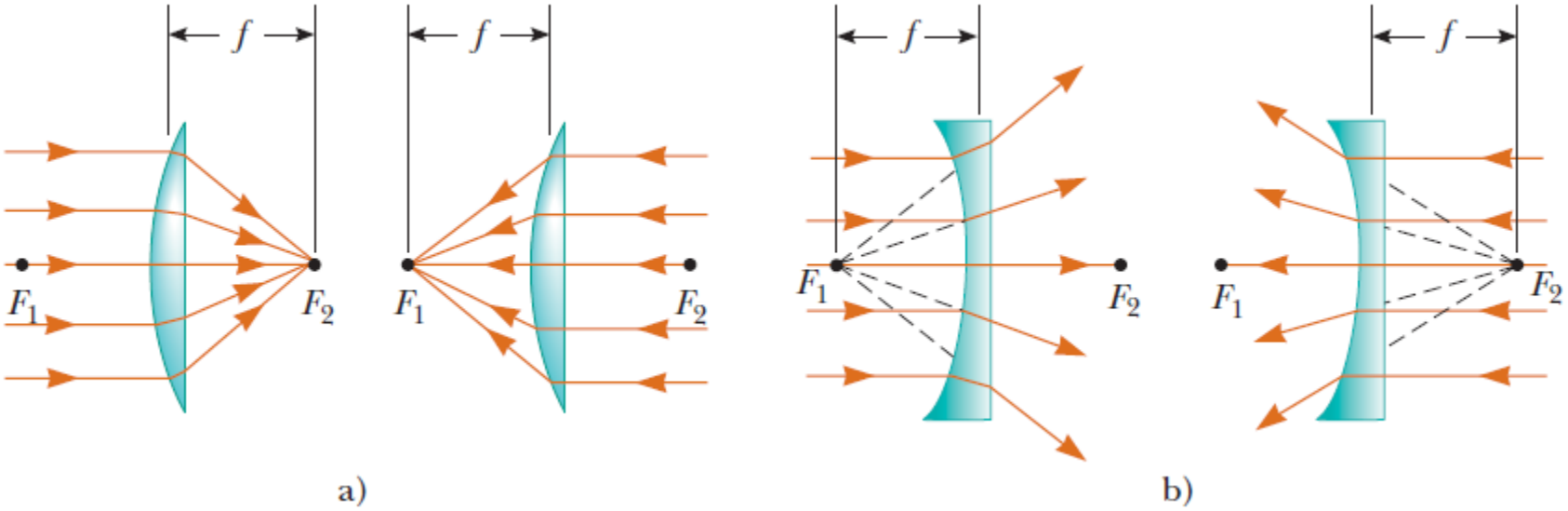


Figura 36.23 Los rayos luminosos paralelos pasan a través de a) una lente convergente y b) una lente divergente. La distancia focal es la misma para los rayos luminosos que pasan a través de cierta lente en cualquiera de las direcciones. Los focos F_1 y F_2 están a la misma distancia de la lente.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Puesto que la luz pasa en ambas direcciones a través de una lente, cada lente tiene dos focos, uno para los rayos luminosos que pasan en una dirección y el otro para rayos luminosos que pasan en la otra dirección.

Aumento de las imágenes

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$

EJEMPLO 36.8 Imágenes formadas por una lente convergente

Una lente convergente tiene una distancia focal de 10.0 cm.

A) Se coloca un objeto a 30.0 cm de la lente. Construya un diagrama de rayos, encuentre la distancia de la imagen y describa la imagen.

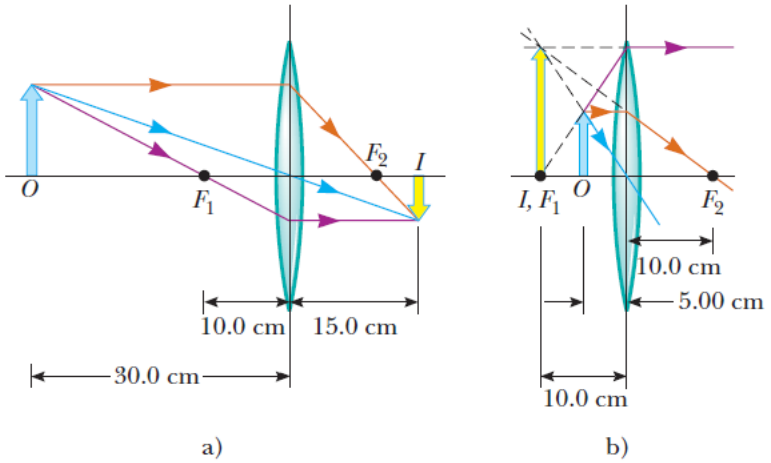


Figura 36.28 (Ejemplo 36.8) Imagen formada por una lente convergente. a) El objeto está más alejado de la lente que el foco. b) El objeto está más cerca de la lente que el foco.

SOLUCIÓN

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{10.0\ \text{cm}} - \frac{1}{30.0\ \text{cm}}$$

$$q = +15.0\ \text{cm}$$

$$M = -\frac{q}{p} = -\frac{15.0\ \text{cm}}{30.0\ \text{cm}} = -0.500$$

Resumen

DEFINICIONES

El **aumento lateral** M de la imagen debida a un espejo o lente se define como la relación de la altura de la imagen h' a la altura del objeto h. Es igual al negativo de la relación de la distancia de imagen q a la distancia objeto p:

$$M \equiv \frac{\text{altura de imagen}}{\text{altura de objeto}} = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \qquad \textbf{(36.1, 36.2, 36.17)}$$

La **amplificación angular** m es la relación del ángulo subtendido por un objeto con un lente en uso (ángulo θ en la figura 36.40b), al ángulo subtendido por el objeto colocado en el punto cercano sin lente en uso (ángulo θ_0 en la figura 36.40a):

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} \qquad \textbf{(36.22)}$$

La relación de la longitud local de la lente de una cámara al diámetro de la lente se llama **número** f de la lente:

$$\text{número } f = \frac{f}{D} \qquad \textbf{(36.20)}$$

CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

En la aproximación de rayo paraxial, la distancia del objeto p y la distancia de la imagen q para un espejo esférico de radio R se relacionan mediante la **ecuación del espejo**:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f} \qquad \textbf{(36.4, 36.6)}$$

donde $f = R/2$ es la **longitud focal** del espejo.

Una imagen se puede formar por refracción de una superficie esférica de radio R. Las distancias del objeto y la imagen para refracción de tal superficie se relacionan mediante

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \qquad \textbf{(36.8)}$$

donde la luz es incidente en el medio para el que el índice de refracción es n_1 y se refracta en el medio para el que el índice de refracción es n_2.

El inverso de la **distancia focal** f de una lente delgada rodeada por aire se conoce por la **ecuación del fabricante de lentes**:

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \qquad (36.15)$$

Las **lentes convergentes** tienen distancias focales positivas, y las **lentes divergentes** tienen distancias focales negativas.

Para una lente delgada, y en la aproximación de rayo paraxial, las distancias del objeto y la imagen se relacionan mediante la **ecuación de lente delgada**:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \qquad (36.16)$$

La amplificación máxima de una lente sencilla con distancia focal f usada como una lupa simple es

$$m_{\text{máx}} = 1 + \frac{25\text{ cm}}{f} \qquad (36.24)$$

La amplificación global de la imagen formada por un microscopio compuesto es:

$$M = -\frac{L}{f_o}\left(\frac{25\text{ cm}}{f_e}\right) \qquad (36.26)$$

donde f_o y f_e son las distancias de las lentes objetivo y ocular, respectivamente, y L es la distancia entre las lentes.

La amplificación angular de un telescopio de refracción se expresa como

$$m = -\frac{f_o}{f_e} \qquad (36.27)$$

donde f_o y f_e son las distancias focales de las lentes objetivo y ocular, respectivamente. La ampliación angular de un telescopio de refracción se conoce por la misma expresión donde f_o es la distancia focal del espejo objetivo.

FIN